



**Variación espacial y temporal del campo de esfuerzos
durante el periodo 2013-2015 en el complejo volcánico
Chiles–Cerro Negro**

Daniela Andrea Hernández Beltrán

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias

Departamento de Geociencias

Bogotá, Colombia

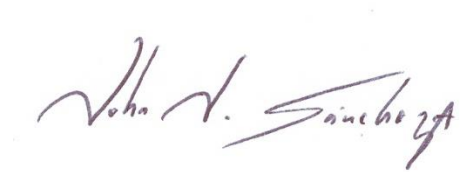
2018

Variación espacial y temporal del campo de esfuerzos durante el periodo 2013-2015 en el complejo volcánico Chiles–Cerro Negro.

Daniela Andrea Hernández Beltrán

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ciencias - Geofísica



Director (a):

Ph.D John Jairo Sánchez Aguilar

Profesor asociado

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín

Línea de Investigación:

Geofísica

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias

Bogotá D.C., Colombia

2018

Aquel que conoce todas las respuestas no se ha hecho todas las preguntas.

Confucio

Agradecimientos

A mi familia y amigos por todo su apoyo, en especial a Carolina Hernández por obligarme a hacer un cronograma de actividades.

Al OVSP-SGC por su oportuna colaboración con los datos para la elaboración de la tesis.

Al profe John Jairo por su orientación y paciencia para la elaboración de la tesis y por ayudarme a crecer tanto personal como académicamente.

Resumen

Desde mediados de siglo XX diferentes estudios y métodos se han desarrollado con el fin de determinar la orientación de los ejes principales de esfuerzos mediante el análisis de las geometrías de fallas. El análisis e inversión de mecanismos focales (MF) también se ha convertido en una técnica común para determinar el estado de esfuerzos en diferentes regiones del mundo.

A mediados del año 2013 se detectó el incremento de actividad sísmica en cercanías del Complejo Volcánico Chiles-Cerro Negro (CVCCN), ubicado en la frontera entre Colombia y Ecuador. Para este estudio se calcularon y analizaron 715 (MF) con magnitudes M_l entre 0 y 3.87, y profundidad entre 0 y 15 km reportados en el catálogo de sismos del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (SGC-OVSP) y el Instituto Geofísico Escuela Politécnica Nacional de Ecuador (IGEPN). Un subgrupo de 405 soluciones MF que cumplían con criterios de calidad y exhibían variabilidad, se utilizó para realizar inversión de tensor de esfuerzos mediante los métodos FMSI (*Focal Mechanism Stress Inversion*) y LSIB (*Linear Stress Inversion by Bootstrapping*) y el análisis de desajuste acumulado, con el propósito de identificar zonas de esfuerzos homogéneos, con al menos un 95% de confianza, en función del tiempo y el espacio.

La inversión de MF dio como resultado un régimen principalmente compresivo con fallas inversas y ocasionalmente de rumbo, y un cambio de régimen a extensivo entre 6,0 km y 15,0 km de profundidad y en el período 13 de diciembre 2014 – 26 de octubre de 2015, ocasionado posiblemente por la presión ejercida por la cámara magmática, esto puede indicar que los enjambres sísmicos en el CVCCN son gobernados principalmente por la tectónica local para el período 2013 – 2015.

Abstract

Since the mid-twentieth century, different studies and methods have been developed in order to determine the orientation of the main stress axes through the analysis of fault geometries. The analysis and inversion of focal mechanisms (MF) has also become a common technique to determine the state of stress in different regions of the world.

In 2013, seismic activity began to be recorded in the surroundings of the Chiles-Cerro Negro Volcanic Complex (CVCCN), located on the border between Colombia and Ecuador. For this study, we calculated and analyzed 716 focal mechanisms with magnitudes M_L between 0 and 3.87, and depth between 0 and 15 km reported in the catalog of earthquakes of the Volcanological Observatory of Pasto (SGC-OVSP) and the Institute of Geophysics of Ecuador (IGEPE), in the vicinity of the Chiles-Cerro Negro Volcanic Complex (CVCCN) during the years 2013 - 2015. We select 405 MF that met quality criteria and showed variability of solutions, the inversion of stress tensor was made through the Focal Mechanism Stress Inversion method (FMSI) (Gephart & Forsyth, 1984) and Linear Stress Inversion by Bootstrapping method (LSIB) (Michael, 1984) and the cumulative misfit analysis to identify homogeneous stress zones with at least 95% confidence in time and space.

The estimate of stress directions, resulted in a mainly compressive regime with inverse faults and occasionally strike slip faults, and a regime change (extensive regime) between 6.0 km and 15.0 km depth and in the period December 13, 2014 - October 26, 2015, possibly caused by the pressure exerted by the magmatic chamber, this may indicate that the seismic swarms in the CVCCN are governed mainly by local tectonics for the period 2013-2015.

Keywords: Chiles-Cerro Negro Volcanic Complex, earthquakes, focal mechanism, moment tensor, stress inversion, cumulative misfit,

Contenido

Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas.....	XVII
1. Introducción	19
1.1 Estudios previos	20
2. Marco Geológico	24
2.1 Estratigrafía.....	25
2.1.1 I etapa volcán Chiles	27
2.1.2 I etapa volcán Cerro Negro.....	27
2.1.3 II etapa volcán Chiles.....	27
2.1.4 II etapa volcán Cerro Negro	27
2.1.5 III etapa volcán Chiles y Cerro Negro	28
3. Marco tectónico y estructural.....	29
3.1 Principales Fallas	30
4. Métodos	32
4.1 Mecanismos focales (MF)	32
4.2 Inversión de MF	34
4.2.1 Método de inversión de esfuerzos con MF – FMSI (Gephart & Forsyth, 1984 – Gephart, 1990).	35
4.2.2 Método lineal de inversión – LSIB (Michael 1984)	37
4.3 Desajuste F (misfit)	39
4.4 Método de desajuste acumulado (cumulative misfit)	39
5. Datos	42
5.1 Sismicidad en el CVCCN entre 2013-2015.....	44
5.2 Mecanismos focales.....	48
6. Resultados.....	51
6.1 Variación temporal y espacial del esfuerzo en el CVCCN	55
6.2 Discusión	72
6.2.1 Limitación de los resultados.....	72

6.2.2	Relación del estado de esfuerzo en función del tiempo y el espacio con la actividad en el CVCCN	74
6.2.3	Comparación de resultados con otros estudios	79
6.2.4	Régimen de esfuerzo y el sistema geotérmico en el CVCCN	80
7.	Conclusiones	82

Lista de figuras

Figura 2-1. Mapa geológico de la región del CVCCN.....	25
figura 3-1: . Mapa de neotectónica de los Andes del norte.	30
Figura 3-2. Mapa de relieve sombreado con los principales lineamientos encontrados en el CVCCN.....	31
Figura 4-1: Flujo diagrama del método para determinar MF	34
Figura 4-2: Proyección estereográfica de la dirección de los esfuerzos principales determinados mediante la inversión de MF usando el método FMSI.....	37
Figura 4-3: Proyección estereográfica de la dirección de los esfuerzos principales determinados mediante la inversión de MF usando el método LSIB.....	39
Figura 4-4: Diagrama explicativo del uso de una gráfica de desajuste acumulado y la curva del valor Z en la interpretación de límites entre zonas de régimen de esfuerzo diferente.	41
Figura 5-1: Mapa de la ubicación del área de estudio.....	43
Figura 5-2: Histogramas con la distribución de valores de (a) RMS, (b) GAP, (c), ERH (d) EHZ, (e) número de estaciones registradas y (f) número de fases usadas que fueron registrados por 8 o más estaciones vs. sismos elegidos de acuerdo a criterios de calidad	45
Figura 5-3: Mapa de epicentros del catálogo final de 405 sismos seleccionados.	46
Figura 5-4: (a) Diagrama magnitud vs tiempo, (b) profundidad vs tiempo de la muestra seleccionada en comparación con el catalogo inicial.....	47
Figura 5-5: Ejemplos de MF calculados usando HASH	48
Figura 5-6: Ejemplo de MF de baja calidad que no fueron considerados para el estudio.	49
Figura 5-7: Diagrama triangular de los 405 MF calculados entre 2013 – 2015 en el CVCCN	50
Figura 6-1: Proyección estereográfica de las direcciones de los esfuerzo principales calculados a partir del set de datos completos usando los métodos de (a) FMSI y (b) LSIB	51
Figura 6-2: Mapa de desajuste con tensor de referencia calculado por Ocampo & Sánchez (2014).....	52
Figura 6-3: Mapa de área de selección de sismos para el cálculo tensores de referencia locales. (a) Selección de sismos en sentido N-S, (b) selección de sismos en sentido NW-SE.	53

Figura 6-4: Proyección estereográfica de las direcciones de los esfuerzo principales calculados a partir de la selección de datos ubicados al E de los edificios volcánicos del CVCCN usando los métodos de (a) FMSI y (b) LSIB (Michael, 1984).....	54
Figura 6-5: Similar a la Figura 6-4, empleando la selección de datos ubicados al SE de los edificios volcánicos del CVCCN usando los métodos (a) FMSI y (b) LSIB.....	54
Figura 6-6: (a) Gráfica de desajuste acumulado vs. número de sismos, ordenados por tiempo para los tres tensores de referencia. (b) Gráfica del valor Z	56
Figura 6-7: Proyección estereográfica de la dirección de esfuerzos principales estimada por la inversión de MF en función del tiempo durante el período 10 de octubre del 2013 - 20 de noviembre del 2014 usando los métodos (a) FMSI y (b) LSIB.....	58
Figura 6-8: Proyección estereográfica de la dirección de esfuerzos principales estimada por la inversión de MF en función del tiempo durante el período 21 de noviembre del 2014 - 26 de noviembre del 2014 usando los métodos (a) FMSI y (b) LSIB.....	59
Figura 6-9: Proyección estereográfica de la dirección de esfuerzos principales estimada por la inversión de MF en función del tiempo durante el período 27 de noviembre del 2014 - 13 de diciembre del 2014 usando los métodos (a) FMSI y (b) LSIB	59
Figura 6-10: Proyección estereográfica de la dirección de esfuerzos principales estimada por la inversión de MF en función del tiempo durante el período 14 de diciembre del 2014 - 26 de Octubre del 2015 usando los métodos (a) FMSI y (b) LSIB.....	60
Figura 6-11: Proyección estereográfica de la dirección de esfuerzos principales estimada por la inversión de MF en función del tiempo durante el período 27 de Octubre del 2015 - 31 de diciembre del 2015 usando los métodos (a) FMSI y (b) LSIB.....	60
Figura 6-12: Localización de sismicidad en función del tiempo.	61
Figura 6-13: (a) Desajuste acumulativo vs. número de sismos, ordenados por profundidad para los tres tensores de referencia. (b) Gráfica del valor Z	62
Figura 6-14: (a) Desajuste acumulativo vs. número de sismos, ordenados por longitud para los tres tensores de referencia. (b) Gráfica del valor Z	63
Figura 6-15: (a) Desajuste acumulativo vs. número de sismos ordenados por latitud para los tres tensores de referencia. (b) Gráfica del valor Z	64
Figura 6-16: Proyección estereográfica de las direcciones de los esfuerzo principales calculados de los sismos entre 0,0 km a 3,5 km usando los métodos de (a) FMSI y (b) LSIB (Michael, 1984).....	65
Figura 6-17: Proyección estereográfica de las direcciones de los esfuerzo principales calculados de los sismos entre 3,5 km a 4,5 km usando los métodos de (a) FMSI y (b) LSIB (Michael, 1984).....	66
Figura 6-18: Proyección estereográfica de las direcciones de los esfuerzo principales calculados de los sismos entre 4,5 km a 5,2 km usando los métodos de (a) FMSI y (b) LSIB (Michael, 1984).....	66
Figura 6-19: Proyección estereográfica de las direcciones de los esfuerzo principales calculados de los sismos entre 5,2 km a 6,0 km usando los métodos de (a) FMSI y (b) LSIB.....	67

Figura 6-20: Proyección estereográfica de las direcciones de los esfuerzo principales calculados de los sismos entre 6,0 km a 15,1 km usando los métodos de (a) FMSI y (b) LSIB.	67
Figura 6-21: Mapa del área de estudio con los modelos de esfuerzo en función de la longitud utilizando los métodos de inversión de FMSI y LSIB	70
Figura 6-22: Mapa del área de estudio con los modelos de esfuerzo en función de la longitud utilizando los métodos de inversión de FMSI y LSIB	71
Figura 6-23: Mapa y perfiles N-S y E-W de los sismos del CVCCN durante el período 2013 – 2015 mostrando los límites de régimen de esfuerzo en el espacio	74
Figura 6-24: Número diario y acumulado de sismos VT, ocurrido en el CVCCN durante el período 2013 - 2015. Tomado de SGC-OVSP (2016).....	75
Figura 6-25: Modelo esquemático de la variación del esfuerzo en función de la latitud, longitud y profundidad.	77
Figura 6-26: Mecanismos para el desencadenamiento de erupciones volcánicas por sismos.....	78

Lista de tablas

Tabla 4-1: Relación entre la forma del tensor de esfuerzos (R), y el estado de esfuerzos que caracteriza	36
Tabla 5-1: Modelo de velocidades del SGC-OVSP utilizado para la localización de sismos.	44
Tabla 5-2: Resumen de la información sobre la calidad de los datos.....	49
Tabla 6-1: Tabla resumen de los parámetros de los tensores de referencia calculados por el metodo FMSI.....	55
Tabla 6-2: Resultados de la inversión para los subgrupos de MF por el método FMSI obtenidos de la gráfica de desajuste acumulados.	68
Tabla 6-3: Resultados de la inversión para los subgrupos de MF por el método LSIB obtenidos de la gráfica de desajuste acumulados.	69

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término
A	Área
\vec{F}	Fuerza
T, B y P	Representación de los ejes de esfuerzos principales
f_i	Desajuste del i-esimo MF
F	Desajuste promedio de los MF
R	Factor de forma en función de magnitudes relativas de esfuerzo
M_L	Magnitud local
M_w	Magnitud de momento

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término
$\vec{\tau}$	Esfuerzo de corte
$\hat{\tau}$	Vector unitario asociado al esfuerzo de corte
$\vec{\tau}(\hat{n}, \sigma)$	Tracción tangencial en el plano de falla
\hat{n}	Vector normal
$\vec{\epsilon}$	Deformación
σ	Tensor de esfuerzos
σ_1	Esfuerzo principal mayor
σ_2	Esfuerzo principal intermedio
σ_3	Esfuerzo principal menor
σ^2	Varianza
φ_T	Acimut del eje T
φ_B	Acimut del eje B
φ_P	Acimut del eje P
δ_T	Buzamiento del eje T
δ_B	Buzamiento del eje B
δ_P	Buzamiento del eje P
λ_T	Valor propio del eje T
λ_B	Valor propio del eje B
λ_P	Valor propio del eje P

Abreviaturas

Abreviatura	Término
-------------	---------

DC	Doble cupla o doble par de fuerzas
CVCCN	Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro
SGC	Servicio Geológico Colombiano
OVSP	Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto
IGEPN	Instituto Geofísico de Ecuador
<i>M</i>	Orden del tensor
MF	Mecanismo focal
GCMT	Global Centroid Moment Tensor
FMSI	Método de inversión de esfuerzos de MF de Gephart & Forsyth (1984) – Gephart (1990)
LSIB	Método lineal de inversión de Michael (1984)
N_T	Número total de MF
<i>N</i>	Norte
<i>S</i>	Sur
<i>E</i>	Este
<i>W</i>	Oeste
<i>NE</i>	Noreste
<i>NW</i>	Noroeste
<i>SE</i>	Sureste
<i>SW</i>	Suroeste
<i>VT</i>	Volcano-Tectónico

1. Introducción

Para entender el origen de la sismicidad, la distribución espacial y temporal de la actividad sísmica y la tectónica de una zona y su relación con la configuración de sistemas geotérmicos es importante el conocimiento de los estados de esfuerzos, el cual ha sido objeto de numerosos estudios como el realizado por Anderson (1951). Varios métodos de inversión de esfuerzos fueron derivados a partir del trabajo realizado por Bott (1959), asumiendo que el deslizamiento a lo largo de la falla ocurre en la dirección del esfuerzo de cizalla, como los propuestos por Carey & Bruiner (1974); Angelier (1979, 1984); Armijo et al. (1982); Gephart & Forsyth (1984); Michael (1984), entre otros. Estos métodos determinan la orientación de los ejes principales de esfuerzos, sin embargo, no aseguran que los planos de fallas observados sean consistentes con un criterio de falla razonable (Gephart & Forsyth, 1984); para superar esta dificultad, Gephart & Forsyth (1984) y Michael (1984) calcularon el tensor de esfuerzos y luego determinaron si el criterio de falla se cumplía a lo largo de cada una de las fallas observadas (Reches, 1987).

Tradicionalmente los métodos de Gephart & Forsyth (1984) y Michael (1984), han sido los más utilizados para realizar inversiones de grupos de MF (MF), ambos pueden ser utilizados de manera práctica en el software ZMAP (Wiemer, 2001) para el análisis de patrones de sismicidad; de manera particular, ambos métodos presentan variaciones en el cálculo del desajuste y el método de selección de MF utilizados en la inversión, generando diferentes grados de precisión, generalmente el método de Gephart & Forsyth (1984) genera resultados más precisos si los datos son de alta calidad, mientras que el método de Michael (1984) provee mejores resultados para datos ruidosos (Hardebeck & Hauksson, 2001).

En el presente trabajo se desarrolla con el fin de determinar el estado de esfuerzos principales en los límites entre Ecuador y Colombia, en la zona de influencia del CVCCN, durante los años 2013 al 2015 y su variación espacio-temporal; para esto, se realizó una revisión bibliográfica del marco geológico y tectónico de la zona, cálculo e inversión de MF que presentaran las mejores características y calidad de información y finalmente, el análisis de los resultados obtenidos.

A continuación se presenta un resumen de antecedentes y estudios previos, así como información bibliográfica adicional acerca de los métodos de inversión de MF y otros aspectos relacionados a esta tesis.

1.1 Estudios previos

Los primeros estudios para determinar el régimen tectónico y esfuerzos asociados fueron desarrollados basados en las relaciones de esfuerzo-deformación descritas por Anderson (1951), quien define la relación entre el sistema de fuerzas y la orientación de las fracturas en un cuerpo rocoso, y Wallance (1951) y Bott (1959) quienes proponen ecuaciones para determinar la orientación de la componente de cizalla sobre un plano en función de la orientación de los ejes de esfuerzos y la relación entre sus magnitudes.

A finales de los años 60 y principio de los años 70 del S. XX, comenzó a desarrollarse la teoría de microtectónica frágil a través de estudios como el de Arthaud (1969), quien plantea modelos que relacionan los ejes de deformación y el movimiento de fallas con orientación aleatoria, Pegarora (1972) quien introduce el método de los diedros rectos (método gráfico) que Angelier & Mechler (1977) difunden posteriormente a través de ordenador y Carey & Brunier (1974) quienes desarrollan el primer modelo numérico para inferir tensores de esfuerzos mediante las planos y estrías de fallas. A partir de los trabajos anteriores, diversas metodologías han sido desarrolladas como las propuestas por: Carey (1979); Angelier et al. (1979); Etchecopar et al. (1981); Michael (1984); Reches (1983, 1987, 1992); entre otros. Autores como Gephart & Forsyth (1984); Michael (1984, 1987); y Angelier (2002); han propuesto diferentes algoritmos para determinar los esfuerzos mediante el análisis poblaciones de MF de los sismos. Por último, se han realizado trabajos cuyo objetivo principal es minimizar los errores de los

tensores de esfuerzos calculados mediante análisis probabilísticos como los desarrollados por: Gephart (1990), Gillard & Wyss (1995), Wyss & Lu (1995) y Lu & Wyss (1996) Frohlich et al. (1997), Frohlich & Davis (1999), Hardebeck & Hauksson, (2001); Sánchez & Núñez-Cornu (2009) y Shan & Liang (2015) entre otros.

En Suramérica se han realizado varios trabajos para determinar esfuerzos como los desarrollados por Kelleher & McCann (1976), Pennington (1981), Gutscher et al. (1999); Taboada et al. (2000); Corredor & Zoback (2003); Cortés & Angelier (2006); Toro & Osorio (2005); Collot et al. (2008); Manchuel et al. (2011); Ocampo & Sánchez (2014); entre otros, enfocados principalmente en métodos de inversión y análisis de datos sismotectónicos y geológicos para establecer el campo de esfuerzos de gran escala en diferentes regiones. De manera particular Gutscher et al. (1999); proponen que en el rango de latitudes 2.5°N - 1°S, que incluye el área de estudio del presente trabajo, se caracteriza por una brecha sísmica a una profundidad intermedia (solo un sismo a ≥ 90 km de profundidad, $Z=120$ km, $M_b=5.8$) y un amplio arco volcánico (160 km de ancho), también que la subducción en esta misma zona tiene una configuración de tipo '*flat slab*' y que la prolongación de la estructura subducida conocida como Cordillera de Carnegie puede extenderse más allá de los 110 km basado en: (1) la brecha sísmica), (2) la morfología regional y de la costa en la que se observa levantamiento del basamento y subsidencia en la zona Sur, y (3) la firma geoquímica volcánica anómala (magmas adakíticos) en el arco volcánico ecuatoriano y en algunos centros volcánicos del arco colombiano. Cortés & Angelier (2006) proponen que en la región que comprende el área suroeste de la costa pacífica colombiana y ecuatoriana los esfuerzos principales son compresivos y actúan en sentido E-W cambiando a WSW-ENE al sur de la latitud 4°N debido a la influencia de la Placa Nazca. Toro & Osorio (2005) determinaron los tensores de esfuerzos para el área norte de los Andes a través de la inversión de MF de los sismos mayores; definiendo para el bloque Andino, esfuerzos compresivos, cuyas direcciones varían con relación a la margen de la costa Pacífica del continente desde WSW-ENE al norte de la latitud 5°N a W-E al sur de esta latitud, debido a que hay variaciones en el vector de desplazamiento de la Placa Nazca que se segmenta en dos con respecto a la orientación de la fosa colombo-ecuatoriana, favoreciendo la reactivación de fallas paralelas a los Andes y creando en términos generales un dominio transpresivo.

Collot et al. (2008) realizaron un estudio sobre el origen de la ramificación de las fallas, su relación con la zona sismogénica y la adición de material fundido en la zona de subducción en el margen oceánico al norte de Ecuador y sur de Colombia, proponiendo, con datos de apilamiento de líneas sísmicas, que la corteza oceánica muestra una zona de ramificación de fallas que es correlacionable con el límite mar adentro de la zona de ruptura del sismo registrado en 1958 (Mw 7.7), la ramificación de las fallas pudo ser el resultado de inversión de fallas normales lístricas y estructuras heredadas pudieron promover el movimiento de los fluidos a través del basamento. Manchuel et al. (2011) observaron la deformación causada por la actividad inter-sísmica a través de un estudio temporal combinando una red sísmica costa adentro y costa afuera de la trinchera de los Andes en la margen sur-colombiana y nor-ecuatoriana, en el área donde se han registrado los sismos de mayor magnitud, con el fin de definir la línea base de la actividad sísmica, concluyendo que las variaciones en actividad de la zona intraplaca, indican que la acumulación de los esfuerzos a lo largo de la interfaz está asociada con el tiempo transcurrido entre los últimos grandes sismos. Ocampo y Sánchez (2014) analizaron los MF y calcularon los tensores de esfuerzos de sismos con Magnitud (Mw) entre 4,9 y 8,8 reportados en el catálogo GCMT (*Global Centroid Moment Tensor*) desde 1976 hasta 2010, para el margen occidental de Sur América, encontrando que las tres regiones tectono-geológicas: Andes del Norte, Andes del Centro y Andes del Sur pueden ser divididas en trece subregiones de acuerdo a variaciones espaciales del tensor de esfuerzos. En la región de los Andes del Norte, que comprende el área del estudio del presente trabajo, los autores proponen, a través de la inversión de los MF y desajuste acumulado, tres secciones en función de la latitud (AN1, AN2 y AN3), en la sección AN1, se observó un régimen de esfuerzos heterogéneo con tendencia a fallas normales mientras que para las secciones AN2 y AN3 predominó la componente de rumbo.

El estado de esfuerzos en áreas volcánicas y zonas volcánicas de interés geotérmico inicialmente fue determinado usando la orientación de diques, la alineación de los conos volcánicos (Hill, 1977; Nakamura, 1977) y mediante el cálculo de los ejes P y T de los planos de fallas (Ui et al., 1977; Heleno da Silva et al., 1999). Adicionalmente se ha calculado el estado de esfuerzos mediante métodos de inversión en áreas como Kaoiki, Hawaii (Wyss et al., 1992); Mauna Loa, Hawaii (Gillard et al. 1992); Spurr, Alaska (Jolly et al., 1994); Etna, Italia (Cocina et al., 1997; Barbieri et al., 2000); Monte Santa Helena,

Estados Unidos (Musumeci et al., 2000); Redoubt, Alaska (Sánchez et al. 2004); Vatnajökull, Islandia (Plateaux et al. 2014), Las Tres Vírgenes, Mexico (Antayhua-Vera et al., 2015) y Monte Ontake, Japón (Terakawa et al., 2016) entre otros.

2.Marco Geológico

El CVCCN se encuentra ubicado sobre la Cordillera Occidental en la frontera entre Colombia y Ecuador, con acceso por carretera desde la inspección de policía de Chiles, municipio de Cumbal, Colombia y desde la población de Tufiño, provincia de Carchi, Ecuador. El volcán Chiles se encuentra en las coordenadas geográficas 0°49'N, 77°56'W y su cima alcanza una altura de 4748 msnm y el volcán Cerro Negro en las coordenadas 0°43'N, 77°57'W, con altura de 4470 msnm (SGC, 2016).

El CVCCN es formado por dos estrato-volcanes activos, predominantemente efusivos, con edificios contiguos, colapsados hacia el N (volcán Chiles) y W (volcán Cerro Negro) que están en la intersección de la falla Chiles-Cerro Negro con las Fallas Chiles-Cumbal y Cerro Negro-Nazate. Las litologías del complejo incluyen flujos de lavas, flujos piroclásticos y flujos de escombros pliocenos, depósitos de origen glacial y basamento de los Grupos Dagua y Diabásico (Figura 2-1). En particular, el edificio actual del volcán Chiles está conformado por varios pulsos de flujos de lava y el volcán Cerro Negro por flujos de lava y piroclastos (SGC, 2018).

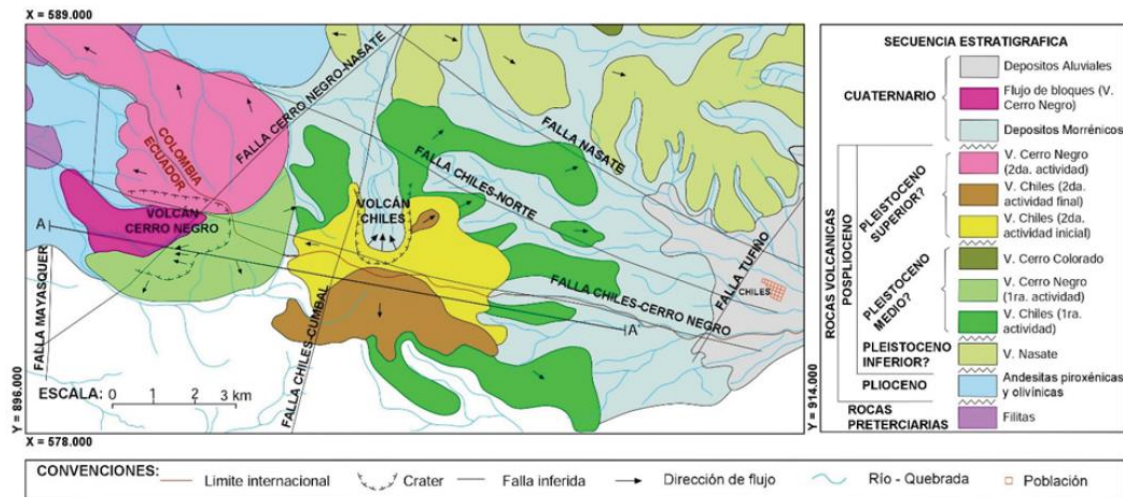


Figura 2-1. Mapa geológico de la región del CVCCN. Tomado de García (2016)

2.1 Estratigrafía

Las unidades geológicas cartografiadas en la región de interés, principalmente descritas por Velásquez. & Parra (2002) se resumen a continuación, en orden de edad de la más antigua a la más reciente.

Grupo Diabásico: Según Velásquez & Parra (2002) el grupo Diabásico es una secuencia de basaltos y diabasas de color verde a verde grisáceo oscuro masivas, microscópicamente, presentan textura diabásica a microdiabásica hasta pilotaxítica en un estado avanzado de espilitización, con minerales como plagioclasas, piroxenos y minerales producto de desvitrificación, de origen toleítico con bajo contenido de sílice y potasio, correspondientes a una secuencia de piso oceánico (Nivia, 2001). La edad reportada para este grupo según una compilación exhaustiva de dataciones paleontológicas obtenidas en diferentes trabajos realizada por Nivia (2001) muestra un predominio Campaniano - Maastrichtiano. El Grupo Diabásico infrayace en contacto inconforme o discordante al el Grupo Dagua.

Grupo Dagua: Secuencia de arcillolitas, areniscas de color negro a grises, ocasionalmente con estratos gruesos de conglomerados y limolitas silíceas de color gris a verdes con tobas y chert altamente plegada, de origen marino profundo, la edad asignada en para este Grupo según Etayo-Serna (1981) en Velásquez, M. & Parra, E (2002) corresponde a Maastrichtiano basado en moldes huecos de bivalvos encontrados en tobas.

Andesitas del Cumbal: Lavas andesíticas de textura porfídica con fenocristales de plagioclasas albita, piroxenos tipo augita e hiperstena y trazas de olivinos, la matriz está compuesta por vidrio color gris (Velásquez, M. & Parra, E, 2002).

Andesitas de Cerro Negro: La base está constituida por una secuencia de flujos piroclásticos con alta porción de material vítreo de color negro (brechas y aglomerados de obsidiana), seguido de una sucesión de flujos de lavas en bloques y megacordadas de colores grises oscuros a rojizos y al techo, flujos piroclásticos y e ignimbritas que sepultaron los valles originales y produjeron una inversión de la topografía (Velásquez, M. & Parra, E, 2002).

Andesitas del Chiles: La base está constituida por una secuencia de flujos de lava masivas y en bloques, seguida por un segundo flujo de lavas con superficie megacordada, y colapso de parte del edificio volcánico que generó un depósito de escombros volcánicos sin material juvenil (pómez) (Velásquez, M. & Parra, E, 2002).

Depósitos de origen glaciar: Corresponde a depósitos de *till* que incluyen morrenas laterales, terminales, y de fondo, con bloques métricos, decimétricos y guijarros en una matriz de lodo, donde se pueden identificar al menos tres pulsos de glaciación que conforman valles en forma de “U” con espesa cubierta de pómez y lapilli (Velásquez, M. & Parra, E, 2002).

Depósitos aluviales: Depósitos de sedimentos no consolidados de limos, arenas, gravas y bloques que conforman terrazas, llanuras de inundación y valles aluviales (Velásquez, M. & Parra, E, 2002).

Episodios eruptivos de los volcanes Chiles y Cerro Negro

La historia evolutiva de los volcanes Chiles y Cerro Negro está compuesta por tres episodios que muestran grandes similitudes, hacia la base, los primeros episodios están representados por estratovolcanes poco diferenciados (andesitas piroxénicas) de edad Plioceno Medio, seguidos de un período de erosión glaciar de los edificios volcánicos, posteriormente comienzan los segundos episodios, con la construcción de los volcanes compuestos por dacitas y andesitas anfibólicas (volcán Cerro Negro) y dacitas, andesitas anfibólicas y piroxénicas y andesitas olivínicas (volcán Chiles) y finalmente un tercer

episodio de actividad explosiva que destruyó parcialmente los conos formando algunos niveles de ignimbritas (Velásquez, M. & Parra, E, 2002).

2.1.1 I etapa volcán Chiles

Constituida por andesitas piroxenicas que aflora en la periferia del edificio volcánico, y se encuentran disectadas por valles glaciares, ocasionalmente muestran alteración hidrotermal.

2.1.2 I etapa volcán Cerro Negro

Constituida por depósitos de flujos piroclásticos con alta proporción de material vítreo de color negro (brechas y aglomerados de obsidiana) y lavas andesíticas, denudados, formando vertientes montañosas con cimas planas. Se encuentra en contacto discordante con el Grupo Dagua (Velásquez & Parra, 2002).

2.1.3 II etapa volcán Chiles

La formación de esta etapa ocurre después un período de inactividad que generó la erosión de Chiles I etapa. Compuesta por lavas dacíticas que se extendieron hacia el E y NE, posteriormente andesitas anfibólicas que fluyeron hacia el E y W y andesitas piroxenicas en dirección SW, S y SE, que se emplazaron a mayores distancias por su menor viscosidad, este período eruptivo concluyó con una efusión de andesitas olivínicas de volumen menor. Según INECCEL-Geotermica Italiana Srl, 1982, esta etapa forma una serie continua de fraccionamiento y diferenciación que refleja, la estratificación de una cámara magmática somera.

2.1.4 II etapa volcán Cerro Negro

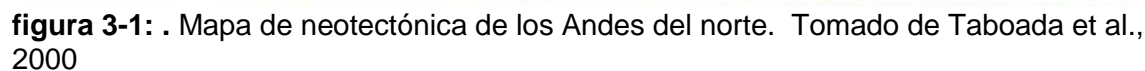
Al igual que en la II etapa del volcán Chiles, esta emisión fue precedida por un período de inactividad, acompañada de actividad glaciaria, compuesta por lavas dacíticas y andesíticas que se extendieron hacia el N. La similitud en la composición, cronología y estructura, sugiere un sistema de alimentación de una cámara magmática común, ligado a una fractura transversal.

2.1.5 III etapa volcán Chiles y Cerro Negro

Después de las II etapas de los volcanes Chiles y Cerro Negro según Velásquez & Parra, 2002, se tiene registro erupciones explosivas formando niveles de ignimbritas asociadas principalmente al volcán Cerro Negro.

3.Marco tectónico y estructural

Los Andes del norte en Colombia son tectónica y estructuralmente complejos debido a la interacción de tres placas litosféricas, dando como resultado tres regiones con esfuerzos relativamente homogéneos en la corteza. La primera región incluye el segmento norte de la Cordillera Oriental y el flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia, esta región se encuentra bajo la influencia de la placa Caribe y se caracteriza por una compresión WNW-ESE con fallamiento principalmente inverso (Taboada et al., 2000); la segunda región, más compleja, está dada por la interacción de las placas Nazca – Caribe – Suramericana dando como resultado una compresión relativa SW-NE con fallamiento de rumbo lateral izquierdo en sentido E-W, y la tercera región incluye la sección SW de la costa Pacífica Colombo-Ecuatoriana, generada por la interacción de las placas Nazca-Suramericana, que se caracteriza por presentar una compresión generalizada E-W con fallamiento inverso con componente de rumbo lateral derecho (Taboada et al., 2000).



La región sur de los Andes del norte en la frontera entre Colombia y Ecuador presenta un estilo estructural complejo con fuertes plegamientos tipo *chevron* con vergencia hacia el W, principalmente en las unidades Cretácicas, mientras que las fallas presentan una tendencia regional N20E (Figura2-1) y una tendencia local transversa WNW-ES E.

Falla Chiles Norte: Es una falla transversal que pasa por el flanco norte del edificio volcánico del Chiles, afectando lavas recientes, con orientación cercana al NW-SE, la intersección con la falla Chiles-Cumbal da lugar a la aparición de una intensa zona de alteración hidrotermal y manifestaciones termales en superficie, hacia el norte es difícil su

seguimiento debido a que se encuentra cubierta por depósitos de origen glaciario, aunque se observan alineamientos de fuentes termales en superficie (CORPONARIÑO, 2009).

Falla Chiles-Cerro Negro: Corresponde a un conjunto de fallas transversales que pasan por los cráteres de los volcanes Chiles y Cerro Negro con una dirección WNW-ESE, es responsable de las manifestaciones de aguas termales “Aguas Hediondas”, “Aguas Negras” y otras, aledañas a los termales de El Indio en Ecuador, también afecta el Domo de Tufiño, depósitos cuaternarios y rocas pliocenas. Su trazado al occidente del volcán Cerro Negro sigue la trayectoria del Río Cainacán (CORPONARIÑO, 2009).

Falla Nasate: Identificada mediante lineamientos topográficos, quebradas y ríos, presenta una dirección NW-SE y afectando el cráter del volcán Nazate (CORPONARIÑO, 2009).

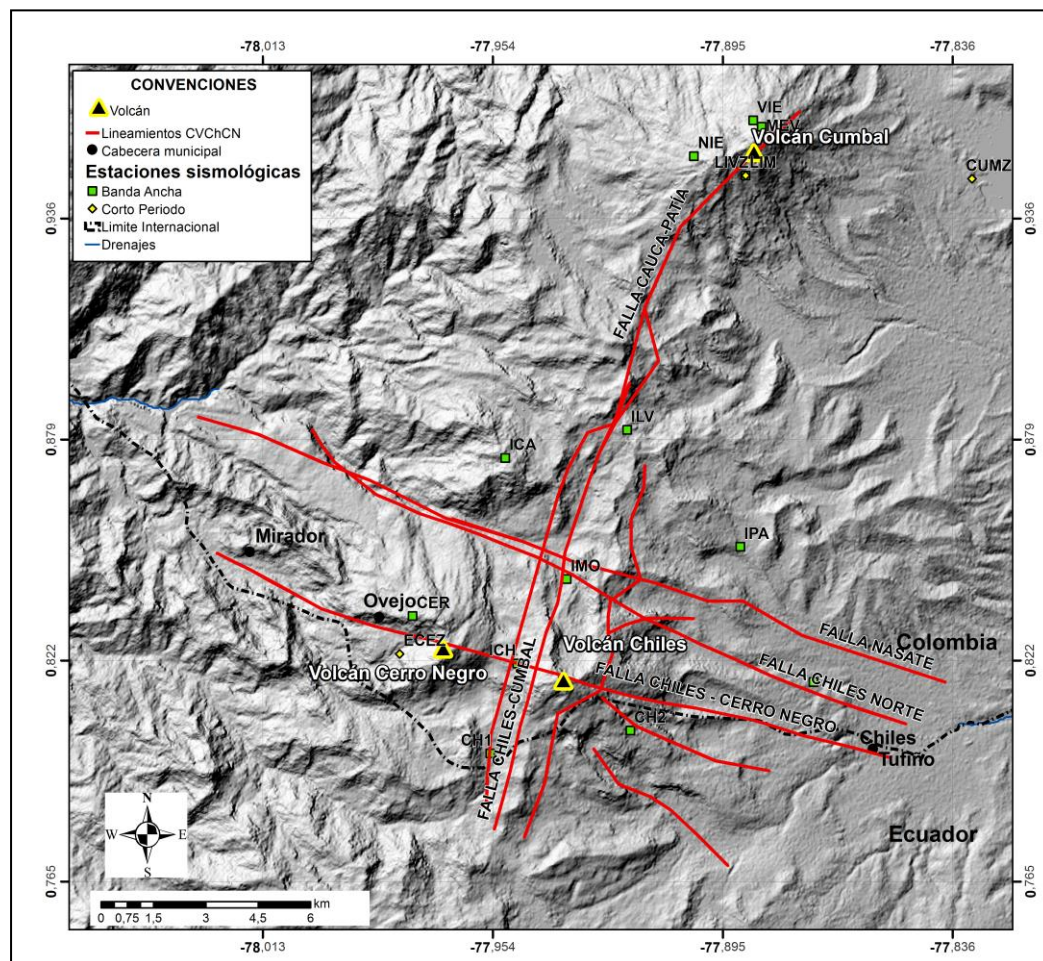


Figura 3-2. Mapa de relieve sombreado con los principales lineamientos encontrados en el CVCCN. Modificado de Bocanegra & Sánchez. 2017.

4. Métodos

En la presente sección se presenta la teoría de los métodos para el cálculo de MF, y de los métodos *Focal Mechanism Stress Inversion*-FMSI (Gephart & Forsyth, 1984) y *Linear Stress Inversion by Bootstrapping*-LSIB (Michael, 1984) para hallar los esfuerzos de una región a través de la inversión de MF.

4.1 Mecanismos focales (MF)

La orientación del plano de falla y la dirección de deslizamiento de los sismos proporcionan una información importante sobre la estructura de la falla y el campo de esfuerzos que está siendo ejercido. Para los eventos de cierta magnitud ($M > 4.5$), las propiedades de la fuente pueden ser definidas a través de la inversión de la forma de ondas sísmicas registradas por sismógrafos de banda ancha o por observaciones geodésicas, sin embargo, la mayoría de los sismos registrados por redes sismológicas locales o regionales, y especialmente, los sismos derivados de actividad volcánica, son la mayoría de las veces muy pequeños para ser estudiados con estas técnicas.

Tradicionalmente los MF calculados para sismos de pequeña magnitud son representados mediante la distribución de las dilataciones y compresiones del movimiento de las partículas según un modelo de doble par de fuerzas (doble cupla) alrededor de una esfera unitaria alrededor de la fuente, mediante la proyección estereográfica, derivados de las observaciones de las polaridades del primer movimiento de la onda P en múltiples estaciones de registro.

En el año 2002 Hardebeck & Shearer introducen un nuevo método para el cálculo de MF a partir de la polaridad del primer movimiento de la onda P, y opcionalmente, la relación

de las amplitudes de las ondas S/P (las cuales no son tenidas en cuenta para el cálculo de MF en el presente trabajo), cuya idea principal es encontrar un grupo de MF para cada evento que sea aceptable, teniendo en cuenta el error de las polaridades esperadas, la ubicación de las fuentes permitidas y el modelo de velocidad sísmica, para esto, se debe identificar el mecanismo que minimice el número de desajustes de la polaridad impulsiva, si se presentan múltiples mecanismos que se ajusten con las polaridades, se debe escoger el subconjunto que minimice el número de desajuste de las polaridades emergentes.

La solución preferencial se encuentra calculando el promedio de las soluciones aceptables (la solución promedio se halla a partir del promedio de las normales a los planos nodales en coordenadas vectoriales), después de remover cualquier valor anómalo, eliminando iterativamente el mecanismo focal más alejado del promedio y luego calculado de nuevo un promedio hasta que todos los mecanismos restantes estén dentro de los 30° de la media, asegurando que, si hay múltiples grupos de soluciones, el mecanismo preferencial es aproximadamente el promedio de la aglomeración de soluciones más probable y no un promedio ponderado de todas las aglomeraciones. La fracción de soluciones más aceptables que están dentro de los 30° de la solución preferida da una estimación de la probabilidad de que la solución correcta este dentro de la aglomeración elegida (Figura 4-1).

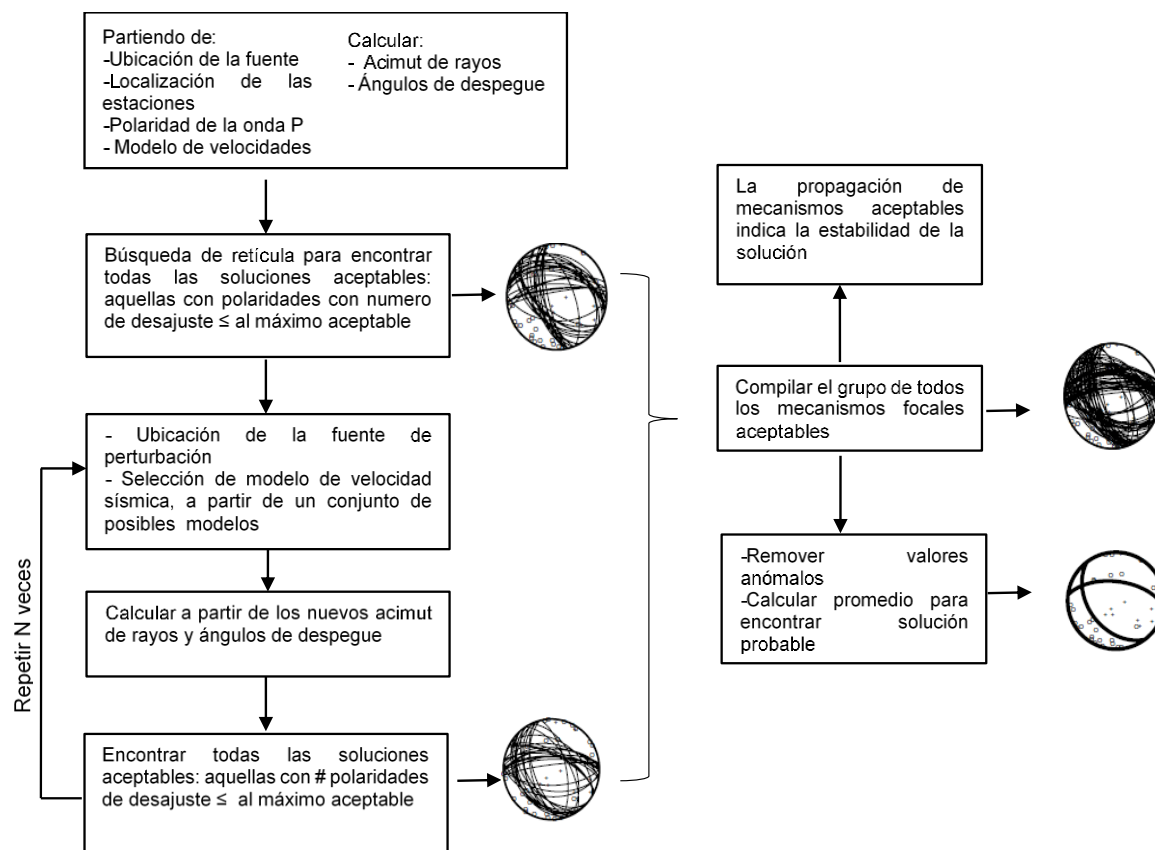


Figura 4-1: Flujo diagrama del método para determinar MF. Modificado de Hardebeck & Shearer (2002).

4.2 Inversión de MF

Los métodos de inversión de MF para obtener la orientación de los esfuerzos principales se basan en suponer que la dirección de deslizamiento de una falla se produce en la dirección del máximo esfuerzo de cizalla, frecuentemente la orientación del plano de falla no es considerada debido a que pueden existir planos de debilidad preexistentes aleatoriamente ubicados. Para que una inversión sea confiable, las orientaciones de los planos de falla deben ser adecuadamente diversas con el fin de poder muestrear todo el tensor de esfuerzos. La isotropía y magnitud del esfuerzo desviador no pueden ser calculados y solo hay cuatro parámetros del modelo independientes: la orientación de los tres ejes de esfuerzo principales (σ_1 : Máximo, σ_2 : Intermedio, σ_3 : Mínimo) y un factor que indica la magnitud relativa de los ejes de esfuerzo.

A continuación se describe el método de inversión de esfuerzos con MF (FMSI) propuesto por Gephart & Forsyth (1984) y el método de inversión lineal (LSIB) propuesto por Michael (1984).

4.2.1 Método de inversión de esfuerzos con MF – FMSI (Gephart & Forsyth, 1984 – Gephart, 1990).

El FMSI usa una búsqueda de retícula sobre los parámetros del campo de esfuerzos para encontrar el tensor de esfuerzos que minimice el desajuste (*misfit*) entre un modelo y la información observada (Gephart, 1990). Los datos a utilizar son el buzamiento, la dirección de buzamiento, y el ángulo de deslizamiento del conjunto de MF.

Este método supone que el tensor de esfuerzos dominante es homogéneo en una región (constante en tiempo y espacio) y la dirección de deslizamiento en cada plano de falla coincide con la dirección del máximo esfuerzo de cizalla (τ) (no hay dirección preferente de deslizamiento). La ambigüedad del plano de falla se resuelve usando el plano nodal que presente el menor desajuste (f), que describe la similitud de la orientación de los ejes P y T para cada mecanismo focal con respecto a la orientación del tensor de esfuerzos más probable. El desajuste promedio (F) refleja la heterogeneidad en el tensor de esfuerzos y es calculado a partir de la suma de cada desajuste individual f_i , definido como el menor ángulo de rotación (una rotación en espacio tridimensional) que hace coincidir la geometría de la falla observada con el modelo propuesto que causaría el deslizamiento en ese plano de falla.

Como se mencionó anteriormente en el método FMSI se calculan los cuatro parámetros del tensor de esfuerzos: σ_1 (máximo), σ_2 (Intermedio), σ_3 (mínimo) y el factor de forma (R) que está en función de las magnitudes relativas de los esfuerzos principales y es expresado como:

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_3 - \sigma_1} \quad (2.1)$$

El tensor de esfuerzos varía en función de las magnitudes relativas de los esfuerzos principales, por lo tanto, a partir del factor de forma R se puede determinar la elipsoide de esfuerzos de la siguiente manera: 1) cuando R tiende a cero, se tiene una dirección preferencial (esfuerzo uniaxial), 2) cuando R tiende a uno, se tienen dos direcciones preferenciales (esfuerzo biaxial) y 3) cuando R tiende a 0,5 se tiene un régimen de esfuerzos triaxial sin dirección preferencial.

De acuerdo a lo anterior, según la forma del tensor, los elipsoides de esfuerzo se pueden clasificar en siete categorías (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Tabla 4-1: Relación entre la forma del tensor de esfuerzos (R), y el estado de esfuerzos que caracteriza. Modificado de Muñoz y de Vicente (2010).

R	Tipo de eje	Régimen de esfuerzo	Esfuerzo principal en la vertical
$R=1$	$\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$	Compresión biaxial	σ_3
$1 > R > 0$	$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$	Compresión triaxial	σ_3
$R=0$	$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$	Compresión uniaxial	σ_3
$1 > R > 0$	$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$	Rumbo	σ_2
$R=1$	$\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$	Extensión biaxial	σ_1
$1 > R > 0$	$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$	Extensión triaxial	σ_1
$R=0$	$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$	Extensión uniaxial	σ_1

Como resultado de la inversión FMSI, se obtiene una proyección estereográfica donde los cuadrados, círculos y triángulos grandes, corresponden al mejor ajuste de la dirección de los ejes principales de esfuerzo y los símbolos pequeños, representan todas las posibles orientaciones de estos esfuerzos (Figura4-2).

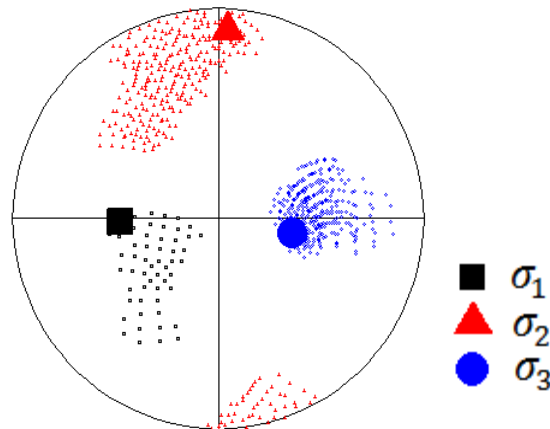


Figura 4-2: Proyección estereográfica de la dirección de los esfuerzos principales determinados mediante la inversión de MF usando el método FMSI (Gephart & Forsyth, 1984). Inversión realizada con 405 MF calculados durante el período comprendido entre los años 2013-2015 en el CVCCN.

4.2.2 Método lineal de inversión – LSIB (Michael 1984)

El LSIB resuelve el tensor de esfuerzos usando inversión de mínimos cuadrados minimizando la diferencia entre el vector unitario en la dirección del deslizamiento y el de esfuerzo de cizalla hallado para cada mecanismo focal (Michael, 1984). Este método fue desarrollado para determinar la orientación y magnitud de los esfuerzos principales a partir del vector de deslizamiento. Los datos utilizados para realizar la inversión son: buzamiento, dirección del buzamiento y ángulo de deslizamiento de un grupo de MF, con el fin de determinar el esfuerzo de cizalla sobre los planos de falla basado en el movimiento relativo definido por el mecanismo focal.

El proceso de inversión se fundamenta en las siguientes hipótesis: 1) La inversión de esfuerzos no es un problema lineal pero puede ser linealizado si se asume que las magnitudes de las tracciones tangenciales son similares en todos los planos de falla, 2) los sismos son independientes, y 3) responden al mismo tensor de esfuerzos.

Asumiendo que la dirección de la tracción tangencial en un plano tiende a ser paralela a la dirección de deslizamiento, entonces:

$$\hat{\tau} = \frac{\vec{\tau}(\hat{n}, \sigma)}{|\vec{\tau}(\hat{n}, \sigma)|} = \hat{s} \quad (2.2)$$

Donde $\vec{\tau}(\hat{n}, \sigma)$ es la tracción tangencial en el plano de falla, \hat{n} es el vector normal, σ Es el tensor de esfuerzos, $\hat{\tau}$ Es el vector unitario asociado con $\vec{\tau}$. Mediante esta inversión se pueden determinar la dirección de los ejes de esfuerzos principales (máximo (S_1), intermedio (S_2), mínimo (S_3)) y el parámetro ϕ que está en función de las magnitudes relativas de los esfuerzos principales y es definido por Angelier (1979) como:

$$\phi = \frac{S_2 - S_3}{S_1 - S_3} \quad (2.3)$$

Para calcular el mejor ajuste del tensor de esfuerzos y la orientación del deslizamiento obtenida por los datos, se halla el desajuste angular denominado como β , que corresponde al ángulo que se forma entre la dirección de deslizamiento y el esfuerzo tangencial sobre un plano de falla, adicionalmente se calcula $\bar{\beta}$ que corresponde al promedio de desajustes calculados para un conjunto de datos, los errores en $\bar{\beta}$ corresponden a la desviación estándar.

Finalmente, Como resultado de la inversión del LSIB, se gráfica una proyección estereográfica donde los círculos, cuadraros y triángulos, indican el mejor ajuste de la dirección de los ejes principales de esfuerzo y las zonas oscuras indican todas las posibles orientaciones (Figura 4-3).

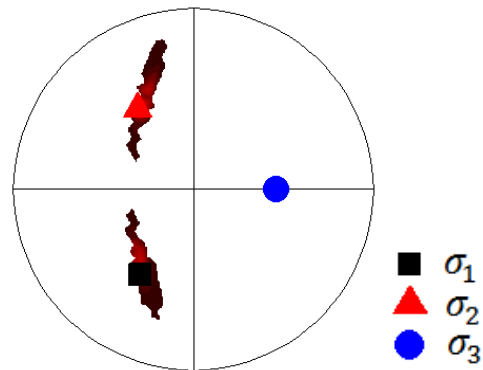


Figura 4-3: Proyección estereográfica de la dirección de los esfuerzos principales determinados mediante la inversión de MF usando el método LSIB (Michael, 1984). Inversión realizada con 405 MF calculados durante el período comprendido entre los años 2013-2015 en el CVCCN

Para este trabajo, se utilizó el software ZMAP (Wiemer, 2001) que tiene incorporados los algoritmos para la inversión de MF basado en el método de inversión de FMSI (Gephart & Forsyth, 1984) y LSIB (Michael, 1984).

4.3 Desajuste F (misfit)

El desajuste para un mecanismo focal (f_i) está definido como el ángulo de rotación más pequeño alrededor de un eje arbitrario que hace que la geometría de la falla (dirección y sentido de deslizamiento) calculada en la inversión coincida con la geometría predicha por un modelo, la magnitud del desajuste (F) refleja la homogeneidad en el conjunto de MF usados y del esfuerzo local. La mejor aproximación a la inversión del tensor de esfuerzos, es aquella que presenta el mínimo ángulo de rotación y por lo tanto el menor valor de F , es decir, el conjunto de MF que presentan el menor error en su orientación (Gephart & Forsyth, 1984).

4.4 Método de desajuste acumulado (cumulative misfit)

En el método de desajustes acumulado propuesto por Wyss & Lu, (1995), se asume que el esfuerzo en una región es heterogéneo, pero puede ser homogéneo si es dividido en sub-volúmenes o calculado en un intervalo de tiempo específico permitiendo determinar cambios temporales de esfuerzo y segmentaciones de las fronteras de placa, fallas, y sistemas magmáticos en regiones volcánicas (Lu, Z. & Wyss, M. 1996).

Para este análisis, se propone un tensor de esfuerzo de referencia, definido por los acimuts y buzamientos de los esfuerzos principales y el valor R , calculados mediante inversión de MF, posteriormente se realiza una comparación entre el tensor de referencia y cada sismo (MF) y la diferencia (desajuste, f) se gráfica en forma acumulada con respecto a la latitud, longitud, tiempo, magnitud, o profundidad. En la gráfica de desajustes acumulados en función del parámetro de interés (por ejemplo, latitud), se pueden identificar los puntos en los que la curva cambia de pendiente y así, determinar variaciones en el estado de esfuerzos para diferentes regiones y/o períodos. Para cuantificar objetivamente el cambio en la pendiente entre dos segmentos de la curva, se estima el estadístico Z (número de muestras (n) mayor que 30) o el estadístico t ($n < 30$), definidos como:

$$Z = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (2.4)$$

$$t = \frac{(\mu_1 - \mu_2)\sqrt{n_1 + n_2 - 2}}{\sqrt{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (2.5)$$

Donde μ_1 es el promedio de desajustes del primer segmento, μ_2 es el promedio de desajustes del segundo segmento, s_1 y s_2 son las desviaciones estándar en los dos segmentos, y n_1 y n_2 son el número de MF en cada segmento.

De las ecuaciones (2.4) y (2.5) se observa que, en esencia, los estadísticos Z o t sirven para comparar promedios en todas las divisiones posibles de los datos en dos partes. Un gráfico del valor Z o t vs. número de sismo, ordenados según el parámetro de interés (Figura 4-4), mostrará valles y picos cuando un cambio de pendiente es detectado, donde el cambio de la pendiente se considera significativo si hay un nivel de confianza del 95% o mayor, nivel que se garantiza para valores de $|Z|$ superiores o iguales a 1.96 y $|t|$ superiores o iguales a 2.01

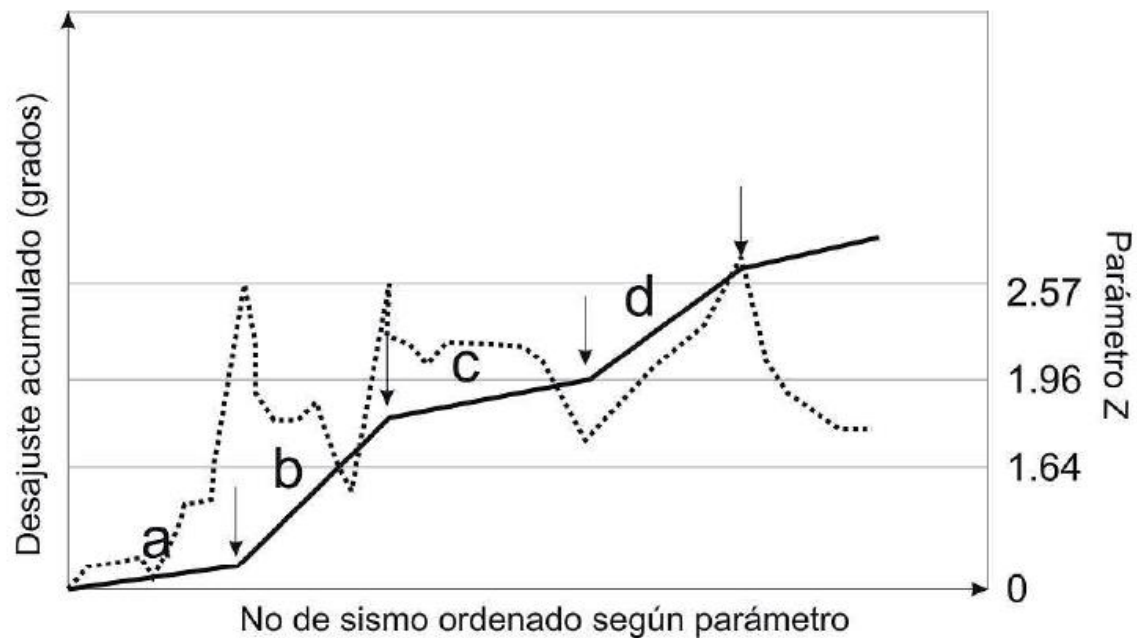


Figura 4-4: Diagrama explicativo del uso de una gráfica de desajuste acumulado y la curva del valor Z en la interpretación de límites entre zonas de régimen de esfuerzo diferente. Línea continua: desajuste acumulado vs No. de sismo. Los segmentos de pendiente baja indican acuerdo entre un grupo de sismos y el tensor de referencia (segmentos a y c) y los segmentos de pendiente alta indican desacuerdo entre un grupo de sismos y el tensor de referencia (segmentos b y d). El propósito de la curva es detectar los puntos donde la pendiente cambia (flechas). Línea punteada: valor Z vs No. de sismo. Los picos señalan inequívocamente un cambio en el régimen de esfuerzo. El valor de Z indica nivel de confianza al cual se detecta el cambio de pendiente. Los valores de Z de 1,64, 1,96, y 2,57 indican un 90%, 95% y 99% de nivel de confianza respectivamente. Tomado de Ocampo & Sánchez. 2014.

5. Datos

Los eventos volcano-tectónicos (VT) corresponden a sismos de corto período atribuidos al fracturamiento abrupto por cambios de esfuerzo durante actividad magmática (inyección o extracción de magma). Para una fuente que a pocos kilómetros de profundidad, los sismos VT presentan arribos claros de las ondas P y S de alta frecuencia, con un pico de frecuencia superior a los 5 Hz y codas cortas (Lahr et al., 1994). Aunque estos sismos usualmente son de pequeña magnitud ($-0,79 < M_l \leq 3,87$, para este caso), debido a la alta sensibilidad de los sismógrafos, las cortas distancias hipocentrales (normalmente < 10 km) y el contenido de altas frecuencias, incluso los eventos más pequeños pueden presentar un arribo impulsivo de la onda P, por lo tanto, la lecturas de las polaridades pueden ser definidas sin ambigüedad (Sánchez et al., 2004).

Los sismos VT fueron registrados por una red permanente de estaciones sismográficas de banda ancha y corto período administrada conjuntamente por el SGC-OVSP y el IGEPN. Las estaciones, localizadas en los primeros 10 km alrededor del CVCCN, fueron desplegadas a finales del año 2013 cuando el SGC-OVSP identificó un aumento en la actividad del CVCCN, que anteriormente había sido atribuida al Volcán Cumbal, procediendo entonces con la instalación de dos estaciones telemétricas de banda ancha (ICH, IMO) en el Volcán Chiles y una en el Volcán Cerro Negro (CER), para detectar mejor la sismicidad, establecer una línea base y hacer seguimiento a la actividad del Complejo Volcánico (SGC-OVSP, 2013). Posteriormente en el año 2014 se instalaron las estaciones de banda ancha ICA e IPA en territorio colombiano y CH1, CH2 y la estación corto período ECEZ en territorio ecuatoriano.

A pesar de la gran productividad sísmica durante los enjambres que comenzaron en el año 2013, sólo los sismos de mayor magnitud son detectables en muchas estaciones.

Para garantizar la mayor cobertura acimutal posible alrededor de las fuentes de sismos VT y mantener un número suficiente de sismos usables, se calcularon MF para aquellos sismos que contaran al menos con ocho primeros arribos, incluyendo en ocasiones los de otras redes de monitoreo del SGC-OVSP, como la red vigilancia del volcán Cumbal (aproximadamente a 15 km al NE del CVCCN), la red vigilancia del volcán Azufral (aproximadamente a 40 km al NE del CVCCN) y la red vigilancia del volcán Galeras que se encuentra aproximadamente a 80 km al NE del CVCCN (Figura 5-1).

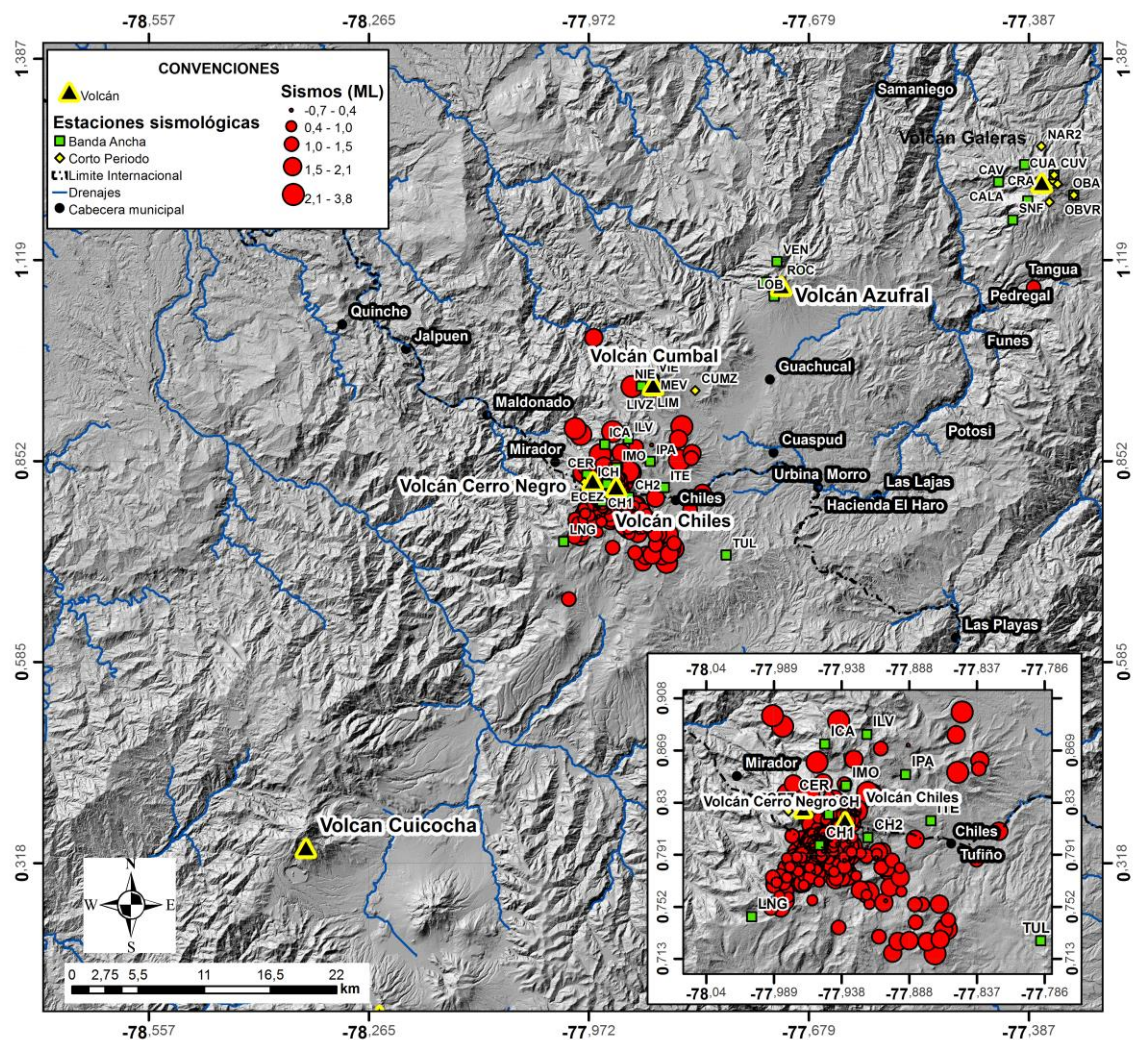


Figura 5-1: Mapa de la ubicación del área de estudio. Los círculos rojos representan 715 epicentros de sismos localizados en el CVCCN, con profundidades entre 0 km y 15 km, el tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud M_L . Los cuadrados verdes

corresponden a las estaciones banda ancha y los diamantes amarillos a las de corto período de la red de monitoreo del SGC-OVSP e IGEPN.

Los datos sobre localización de los sismos, suministrados por el SGC-OVSP e IGEPN, fueron obtenidos con el software HYPO71, todos los eventos fueron revisados para verificar los primeros arribos y lecturas de la polaridad de la onda, y corregidos en caso de ser necesario. El modelo de velocidad utilizado corresponde a seis capas sobre un semiespacio (Tabla 5-1).

Tabla 5-1: Modelo de velocidades del SGC-OVSP utilizado para la localización de sismos.

Capa	Profundidad (km)	Velocidad de Onda P (km/s)
1	0,0 – 2,0	3,50
2	2,0 – 4,0	3,70
3	4,0 – 8,0	4,00
4	8,0 – 26,0	6,00
5	26,0 – 44,0	6,80
6	>44,0	8,00

5.1 Sismicidad en el CVCCN entre 2013-2015.

Durante el período de Octubre 2013 – Diciembre 2015, se localizaron aproximadamente 16300 sismos VT, ubicados principalmente al suroccidente y occidente del volcán Chiles, también con ocurrencia de sismicidad dispersa al norte y sureste del CVCCN (Figura 5-1), cuyas profundidades, en el rango 0 km - 15,1 km, se encuentran principalmente distribuidas entre 3 km y 8 km, con GAP acimutal entre 52° y 346°, errores en la horizontal (ERH) que varían de 0,1 km a 7,4 km y errores en la vertical (ERZ) entre 0,1 km y 447,2 km. Para el presente análisis, inicialmente se seleccionaron 715 eventos que fueron registrados por ocho o más estaciones para el cálculo de MF y posteriormente, se eligió un subgrupo de 405 sismos que presentaban mejores factores de calidad de localización como el MF calculado para realizar la inversión y determinar el estado de esfuerzos. Estos 405 eventos tienen errores promedio en la horizontal y vertical de 0,9 km y 1,26 km respectivamente, el RMS entre 0,03 y 1,23 con un promedio de 0,17 y un GAP entre 56° y 322° con un promedio de 160° (Figura 5-2).

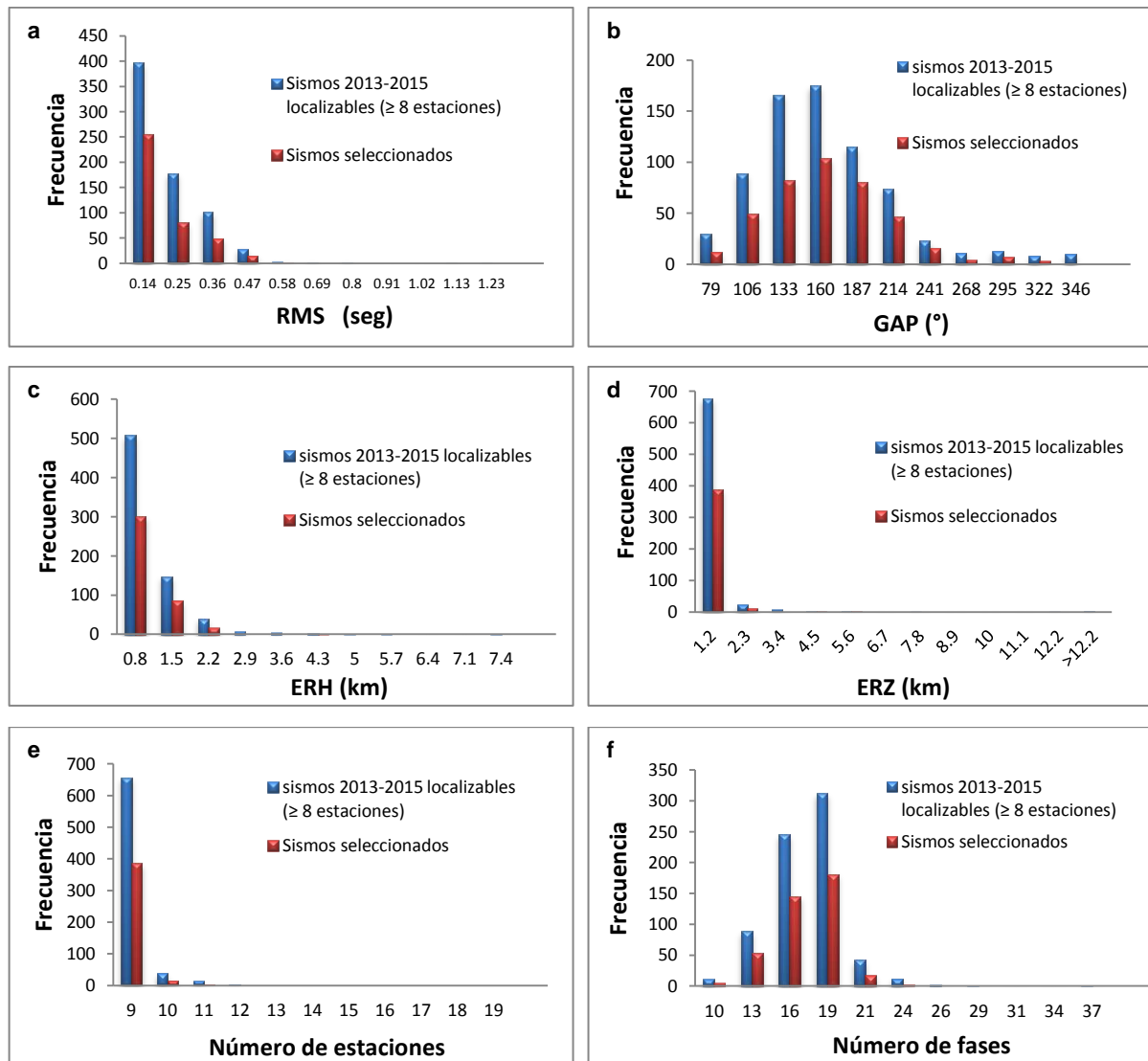


Figura 5-2: Histogramas con la distribución de valores de (a) RMS, (b) GAP, (c), ERH (d) ERZ, (e) número de estaciones registradas y (f) número de fases usadas en la localización de los sismos VT ocurridos durante el período 2013 – 2015 en el CVCCN que fueron registrados por 8 o más estaciones (715) vs. sismos elegidos de acuerdo a criterios de calidad (405).

La figura 5-3 muestra la localización de los eventos del catálogo definitivo de los 405 eventos seleccionados por factor de calidad.

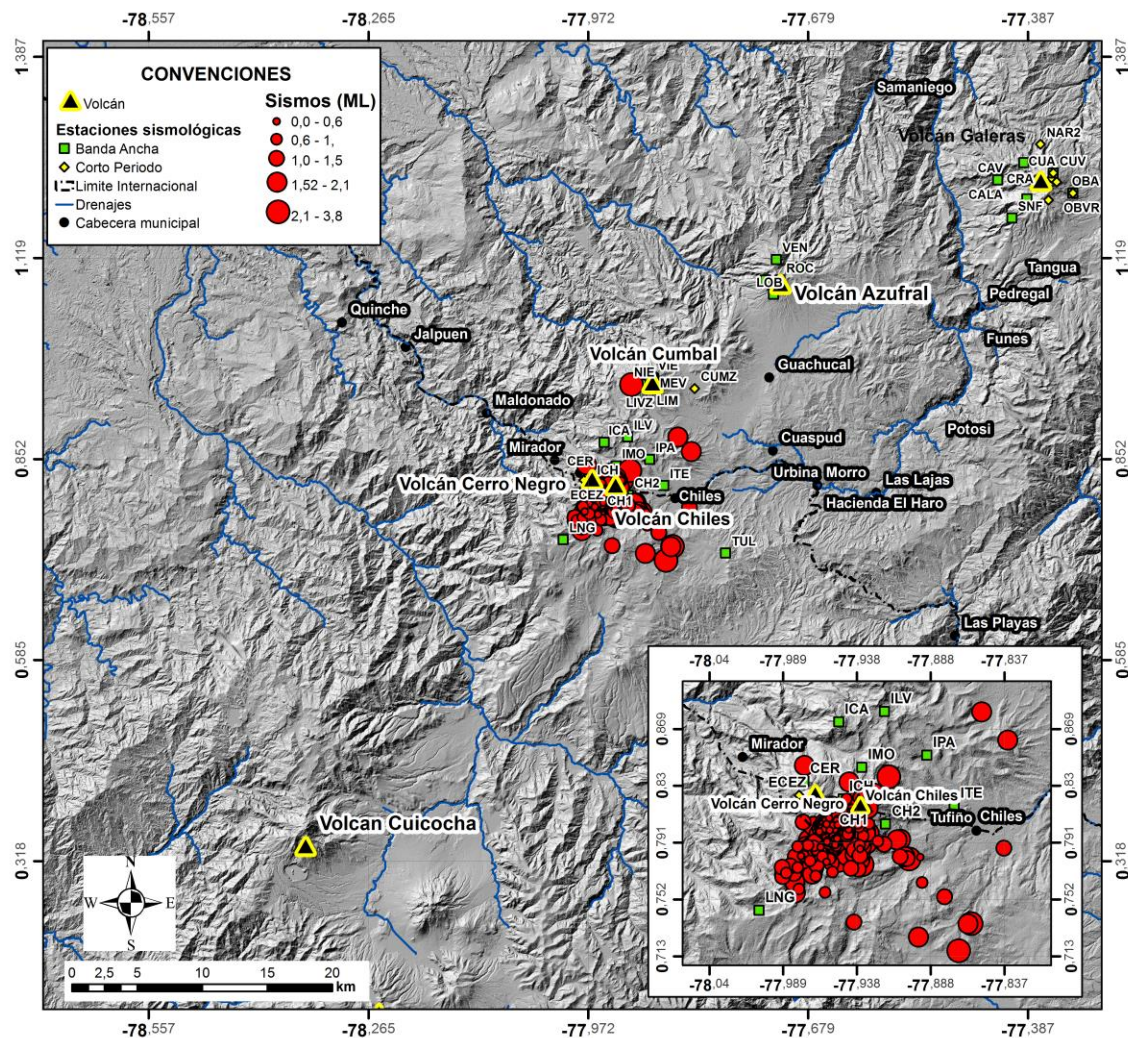


Figura 5-3: Mapa de epicentros del catálogo final de 405 sismos seleccionados. Los círculos rojos representan los epicentros de sismos localizados en el CVCCN, el tamaño de los círculos es proporcional a la magnitud M_L . Los cuadrados verdes corresponden a las estaciones banda ancha y los diamantes amarillos a las de corto período de la red de monitoreo del SGC-OVSP e IGEPN.

El catálogo de seleccionado fue localizado usando entre 8 y 11 estaciones, con número de fases (lecturas de ondas P y S) entre 8 y 22, magnitudes en el rango 0 y 3,87 (M_L) y profundidades entre 0 km y 15 km. En la figura 5-4 se observan la distribución de magnitudes y profundidades a través del tiempo de los sismos registrados por 8 o más estaciones vs. los 405 sismos seleccionados. Se observan concentraciones de actividad

sísmica a finales del año 2013, finales del 2014 y desde mediados hasta finales del 2015, correspondientes a enjambres sísmicos. Del año 2013 se eligieron dos eventos que cumplen con los criterios de calidad ya que, durante esa época, la red sismológica del SGC-OVSP y IGEPN no tenía cobertura suficiente para localizaciones óptimas y los valores de GAP acimutal variaban entre 250° y 346° . Las profundidades se encuentran distribuidas principalmente entre los 3 km y 8 km, el sismo más profundo (15 km) ocurre el día 21 de noviembre del 2014.

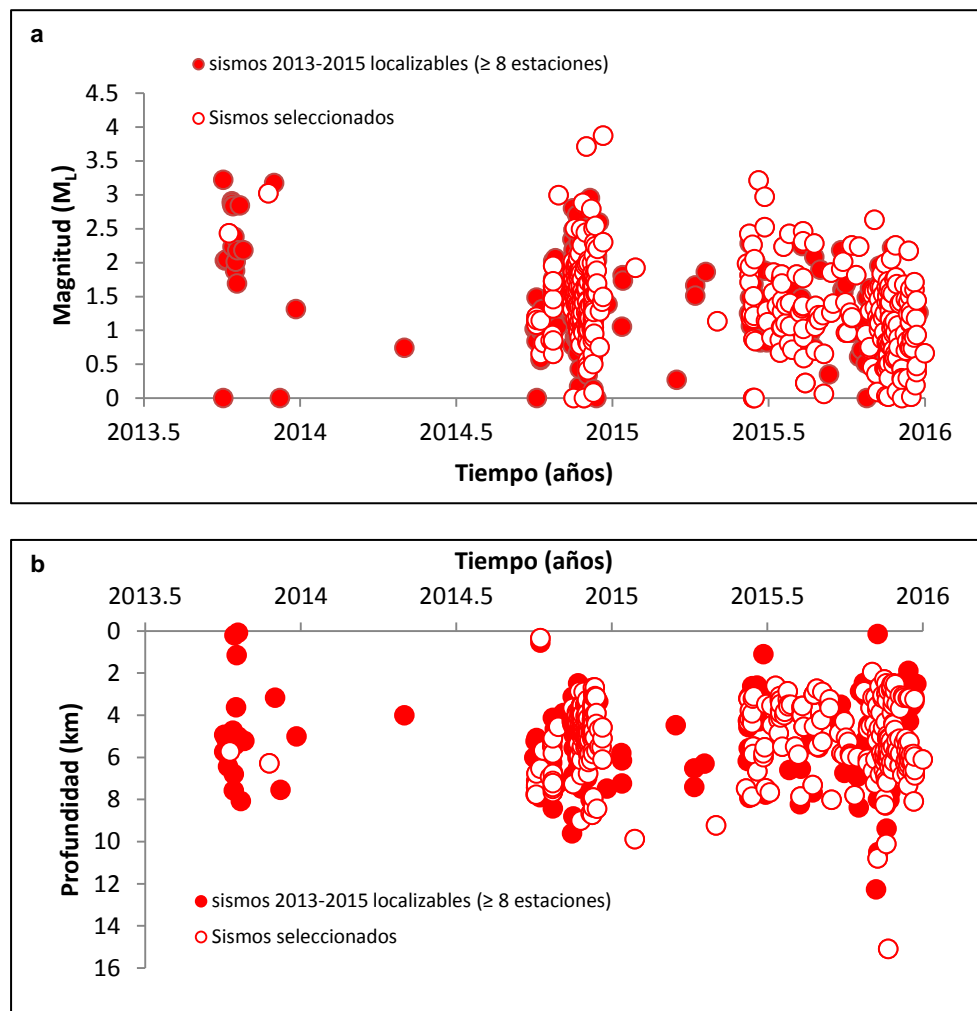


Figura 5-4: (a) Diagrama magnitud vs tiempo, (b) profundidad vs tiempo de la muestra seleccionada en comparación con el catalogo inicial. Los círculos rellenos de color rojo corresponden a la muestra sin seleccionar, mientras que los círculos rellenos de color blanco corresponden al catálogo seleccionado.

5.2 Mecanismos focales

Los MF (MF) fueron calculados con el programa HASH (Hardebeck & Shearer, 2002) para los 405 sismos registrados en 8 o más estaciones que presentaban mejores factores de calidad. No se consideraron soluciones tipo CLVD y se asume que el catalogo seleccionado corresponde a fuentes de doble par de fuerzas (ver sección anexos).

Debido a que el éxito de una buena inversión para hallar el tensor de esfuerzos depende en gran medida de la calidad de los MF, se seleccionaron los sismos teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Mecanismo focal calculado con mínimo 8 polaridades.
- El número de polaridades discrepantes debe ser ≤ 1 .
- Desajuste $\leq 0,5$.
- Buena distribución de polaridades en la esfera focal, juzgada a partir de inspección visual y con apoyo del parámetro STDR.

A continuación se presentan algunos ejemplos de MF de buena calidad calculados para el CVCCN (figura 5-5).

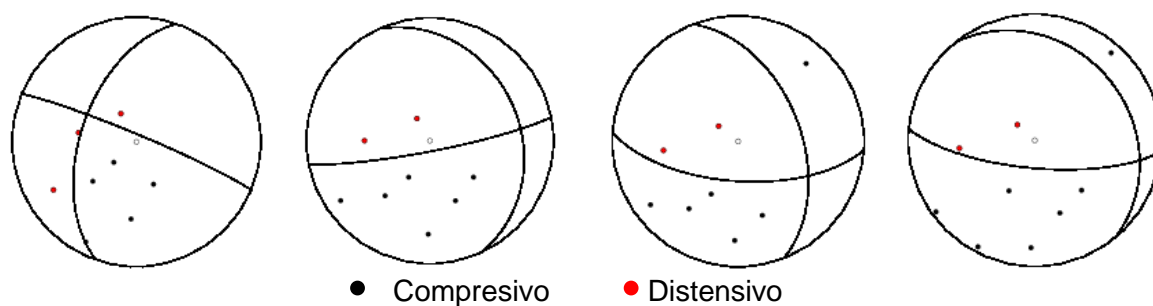


Figura 5-5: Ejemplos de MF calculados usando HASH. Los círculos rojos y negros corresponden a polaridades distensivas y compresivas, respectivamente. Un círculo sin relleno marca el centro de la proyección estereográfica de hemisferio inferior.

Los MF que no cumplían con alguna de las condiciones anteriormente mencionadas, fueron considerados de baja calidad y no fueron tenidos en cuenta para realizar la inversión (Figura 5-6)

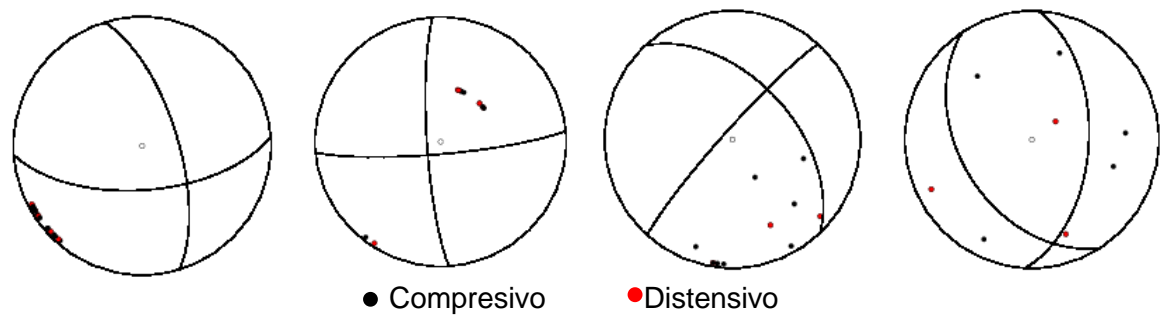


Figura 5-6: Ejemplo de MF de baja calidad que no fueron considerados para el estudio. Convenciones como en la Figura 5-5.

De los sismos seleccionados con los anteriores criterios, se tiene que el 25% de los MF fueron calculados con más de ocho lecturas de polaridad, el 53% tiene un desajuste < 0,08, el 63% tiene un STDR > 0,74 y aproximadamente el 20% de los MF cumple con dos de estas características (Tabla 5-2).

Tabla 5-2: Resumen de la información sobre la calidad de los datos

Para 405 sismos registrados durante Octubre de 2013 a Diciembre de 2015							
Parámetros estadísticos							
	STDR	Desajuste	Incertidumbre del plano nodal 1 IPN1 (grados)	Incertidumbre del plano nodal 2 IPN2 (grados)	Número de lecturas P	ERH (km)	ERZ (km)
Rango	0,28 – 0,87	0 – 0,5	34 - 61	29 - 59	8– 11	0,1 – 4,3	0,1 – 5,2
Promedio	0,74	0,08	44,8	45,65		0,8	1,26
Comentarios	254 sismos con STDR por encima del promedio	217 sismos con desajuste por debajo del promedio	261 sismos con IPN1 por debajo del promedio	206 sismos con IPN2 por debajo del promedio	101 sismos con más de 8 lecturas de onda P	326 sismos con ERH por debajo del promedio	334 sismos con ERZ por debajo del promedio
<ul style="list-style-type: none"> ERH, ERZ: Error de localización en la horizontal y en la vertical 							

Para evaluar la variabilidad de los MF se representaron los datos en un diagrama triangular donde los vértices representan un MF de tipo normal, inverso o de rumbo (Frohlich, 1992). Para calcular y graficar los diagramas se utilizó el programa FMC 1.01 (Álvarez-Gómez, 2015), un algoritmo escrito en lenguaje Python. La Figura6-7 muestra el diagrama triangular del conjunto de datos que incluye escasas soluciones cercanamente

puras de rumbo, normales o inversas, y en su gran mayoría exhibe una mezcla de componentes.

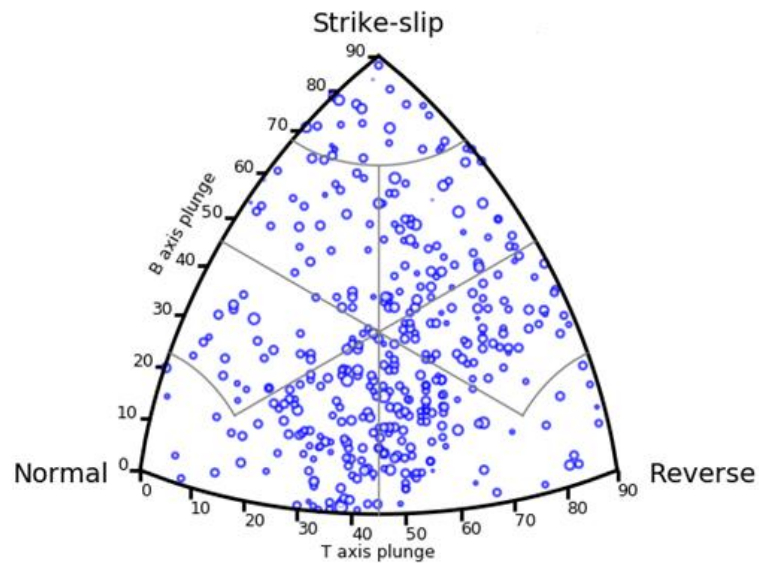


Figura 5-7: Diagrama triangular de los 405 MF calculados entre 2013 – 2015 en el CVCCN. Las líneas separan regiones de estilo de falla normal, inverso, de rumbo y conjugadas

6.Resultados

Para calcular el tensor de esfuerzos mediante inversión de MF, primero se utilizó el conjunto de datos completos, correspondiente a 405 sismos, con el fin de corroborar si todas las geometrías de las rupturas en la zona podían ser explicadas por un mismo tensor de esfuerzo (Figura 6-1), encontrándose un desajuste promedio grande ($F=10^\circ$), y varianza de 0,19 indicando que el grupo de sismos no cumple con la suposición de un esfuerzo homogéneo en el área.

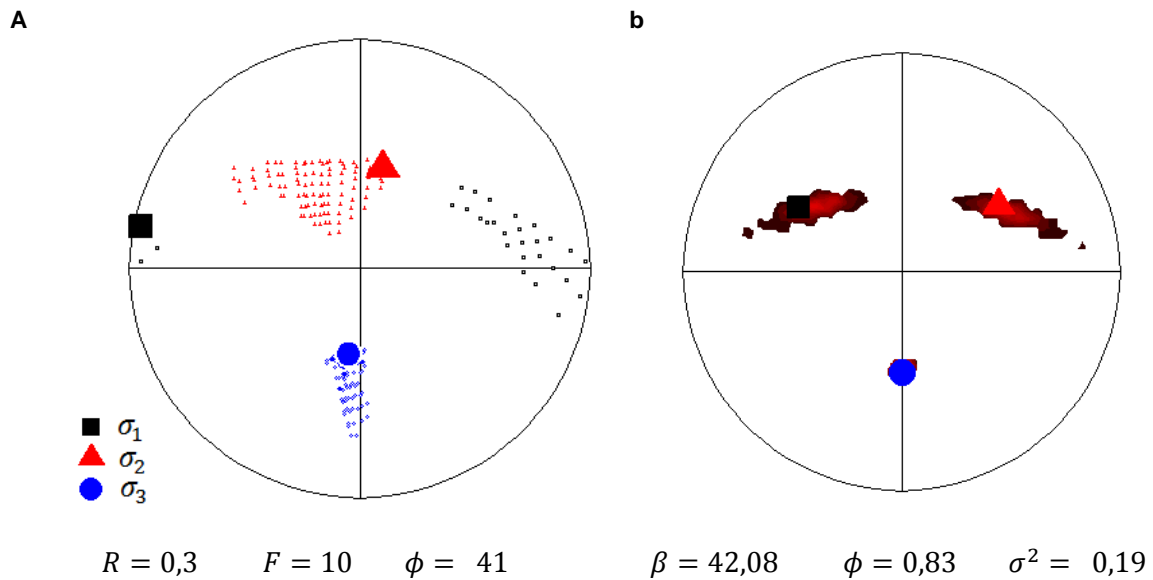


Figura 6-1: Proyección estereográfica de las direcciones de los esfuerzo principales calculados a partir del set de datos completos usando los métodos de (a) FMSI (Gephart y Forsyth (1984) y (b) LSIB (Michael 1984). Cuadrados negros, triángulos rojos y círculos azules representan los esfuerzos principales máximos, intermedios y mínimos respectivamente

Con el fin de identificar subregiones de esfuerzos homogéneos en la zona de estudio, se construyó un mapa de desajustes (Figura 6-2) partiendo del tensor de referencia calculado por el método FMSI (Gephart & Forsyth, 1984) por Ocampo & Sánchez (2014) utilizando sismos de 10 km a 70 km de profundidad en la región de los Andes del Norte (entre las latitudes 7°N-3°S), las direcciones e inclinaciones de los ejes σ_1 y σ_3 en este tensor son $\sigma_1 = 248^\circ/49^\circ$ (acimut/inclinación), $\sigma_3 = 10^\circ/25^\circ$, $R= 0,7$ y $F=6,4^\circ$.

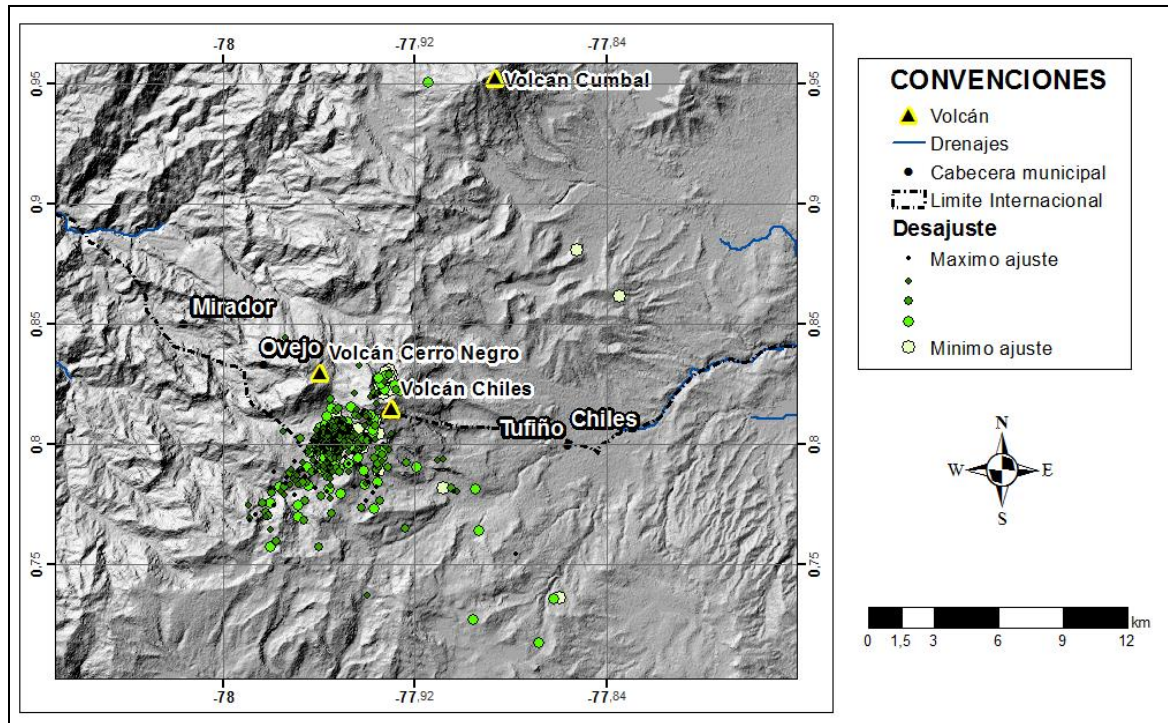


Figura 6-2: Mapa de desajuste con tensor de referencia calculado por Ocampo & Sánchez (2014). Los sismos que mejor se ajustan al tensor de referencia se representan con círculos pequeños de color verde oscuro, mientras que aquellos sismos que no son explicados por el tensor de referencia se representan con círculos grandes de color claro.

A partir de esta información se identificó un grupo de sismos, ubicados al oriente, relativamente alejados de los centros volcánicos y se calcularon tensores de referencia para esta zona mediante dos selecciones que presentan un área en común, la primera, tuvo en cuenta los sismos localizados hacia el E del CVCCN y la segunda aquellos localizados hacia el sector SE del CVCCN (Figura6-3).

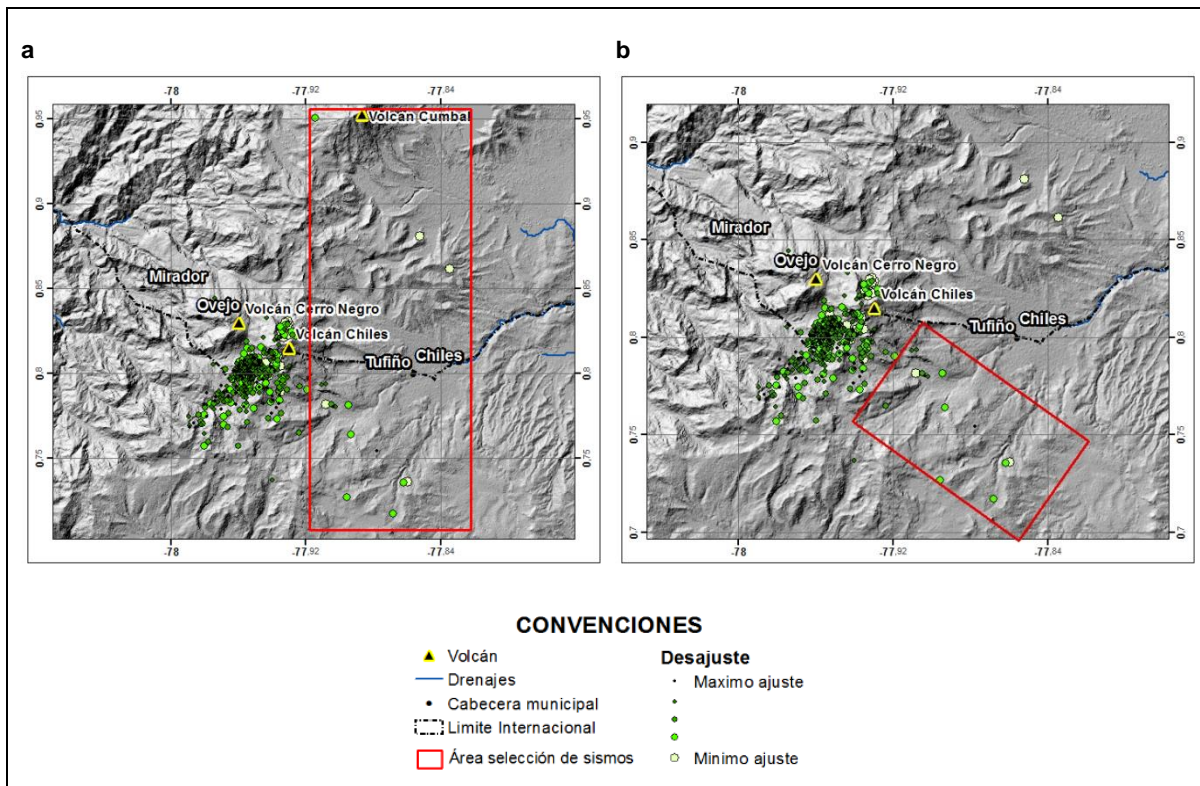


Figura 6-3: Mapa de área de selección de sismos para el cálculo tensores de referencia locales. (a) Selección de sismos en sentido N-S, (b) selección de sismos en sentido NW-SE, el recuadro rojo indica el área de selección de sismos.

El cálculo del tensor de referencia para la primera selección (sismos ubicados al E) fue realizado con 12 sismos, por el método FMSI, σ_1 presenta un acimut/inclinación de $72^\circ/48^\circ$, σ_3 $179^\circ/14^\circ$ y $F= 4,5^\circ$ indicando fallamiento de rumbo, mientras que por el método de LSIB σ_1 presenta una orientación acimut/inclinación de $290^\circ/59^\circ$ y σ_3 $179^\circ/12^\circ$ indicando fallamiento de tipo normal (figura 6-4). El segundo tensor de referencia calculado a partir de la selección de 14 sismos (sismos ubicados al SE) arrojó por el método FMSI una orientación para σ_1 acimut/inclinación $49^\circ/39^\circ$ y σ_3 $262^\circ/46^\circ$ con $F= 4,6^\circ$, dando como resultado un tipo de fallamiento de rumbo, y por el método LSIB la solución presenta un acimut/inclinación para σ_1 $304^\circ/61^\circ$ y para σ_3 $179^\circ/17^\circ$ indicando fallamiento de tipo normal (figura 6-5).

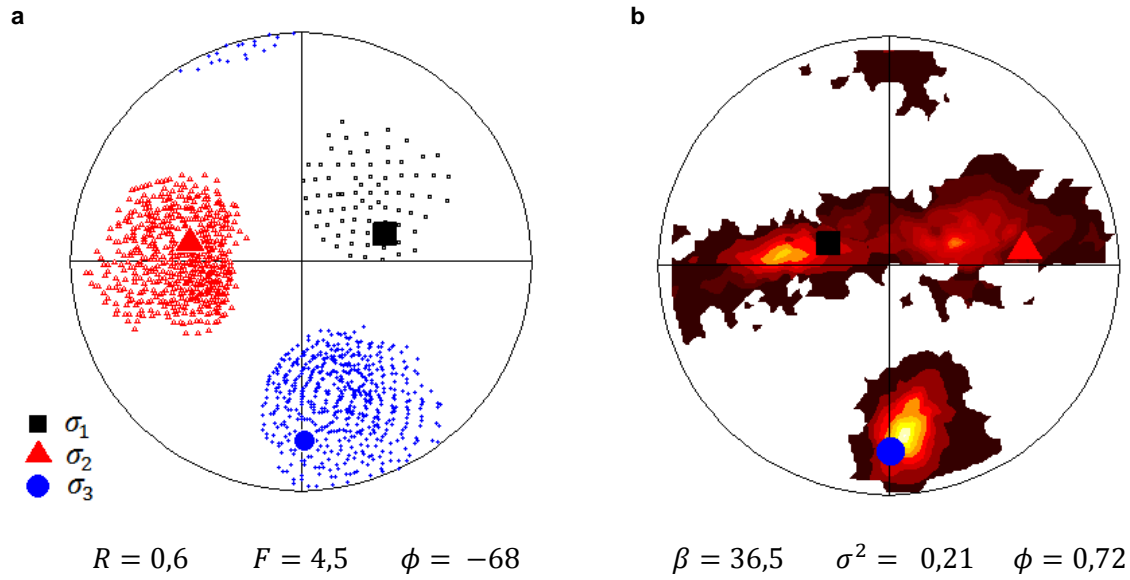


Figura 6-4: Proyección estereográfica de las direcciones de los esfuerzo principales calculados a partir de la selección de datos ubicados al E de los edificios volcánicos del CVCCN usando los métodos de (a) FMSI (Gephart y Forsyth, 1984) y (b) LSIB (Michael, 1984). Convenciones iguales a la figura 6-1.

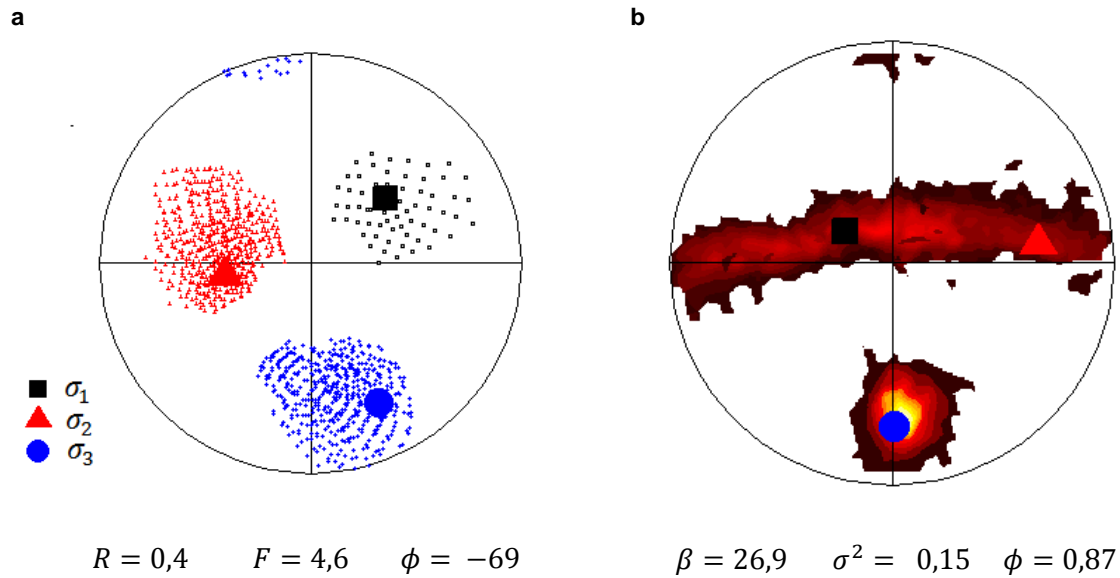


Figura 6-5: Similar a la Figura 6-4, empleando la selección de datos ubicados al SE de los edificios volcánicos del CVCCN usando los métodos (a) FMSI (Gephart y Forsyth, 1984) y (b) LSIB (Michael, 1984). Convenciones iguales a la figura 6-1

Aunque las inversiones realizadas con los MF que se encuentran relativamente alejados de los conos volcánicos del CVCCN, se efectuaron con pocos sismos se decidió optar por el tensor de referencia calculado con la selección de sismos ubicados al E del complejo CVCCN ya que el tensor obtenido con el método de Gephart & Forsyth (1984) presenta el menor desajuste y es el tipo de falla más cercano a lo descrito por Taboada et al., (2000), que define para esta región una compresión generalizada E-W con fallas de tipo inverso y componente de rumbo (Tabla 6-1).

Tabla 6-1: Tabla resumen de los parámetros de los tensores de referencia calculados por el metodo FMSI

Tensor de referencia	σ_1 (°) (acm/buz)	σ_2 (°) (acm/buz)	σ_3 (°) (acm/buz)	Desajuste (F°)	Tipo de falla
Ocampo & Sánchez (2014)	248/49	116/30	10/25	6.4	Normal
Selección sismos al E del CVChN	72/48	280/38	179/14	4.5	Rumbo
Selección sismos al SE del CVChN	49/39	262/46	154/17	4.6	Rumbo

6.1 Variación temporal y espacial del esfuerzo en el CVCCN

Debido a que la inversión realizada utilizando 405 sismos en el período 2013-2015 mostró un desajuste alto (Figura 6-1) indicando heterogeneidad en la zona, se buscaron subgrupos de sismos que fueran explicados por campos de esfuerzos aproximadamente uniformes mediante el método de desajuste acumulado, que consiste en graficar el número de los sismos acumulados, ordenados por tiempo, vs. los valores de desajuste acumulados, usando un tensor de referencia seleccionado (Figura 6-6), y adicionalmente se realizó esta comparación con otros tensores de referencia calculados (Ocampo & Sánchez (20014) y Selección de sismos ubicados al SE) con el fin de confirmar épocas de cambios en el esfuerzo de la región.

A partir del análisis de las gráficas de desajuste acumulado de los sismos ordenados por tiempo se identificaron cuatro épocas de cambios de pendiente con el tensor de referencia selección con un 99% de confianza, en los sismos 52, 90, 170 y 265, que corresponden a las fechas: 20/11/2014, 26/11/2014, 13/12/2014 y 26/08/2015. El análisis con el tensor de referencia Ocampo & Sánchez (2014) arrojó límites en las fechas 20/11/2014, 09/12/2014 y 07/20/2015 (sismos 52, 144 y 240) con una confianza del 95%, y con el tensor NW-SE se identificó un cambio de pendiente en el sismo 43 (11/11/2014) con una confianza del 99% y otros dos cambios en los sismos 287 y 348 con confianza del 99% correspondientes a las fechas 8/11/2015 y 24/11/2015 (Figura 6-6).

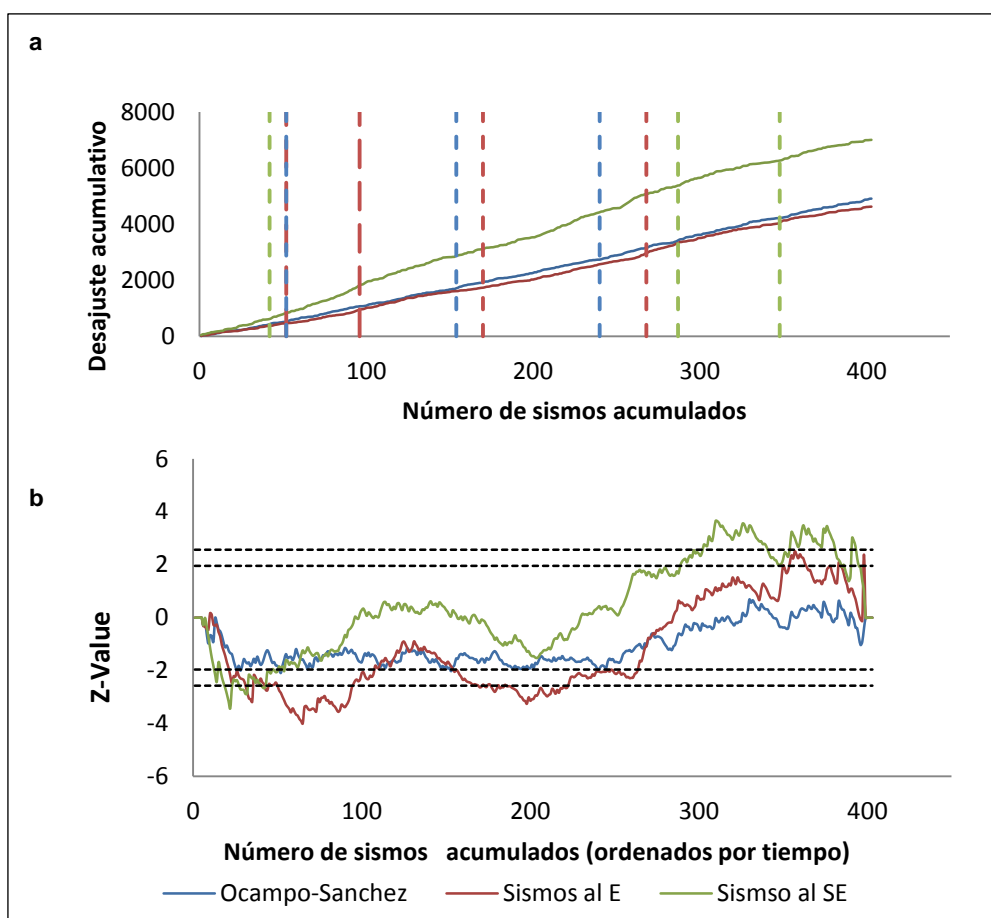


Figura 6-6: (a) Gráfica de desajuste acumulado vs. número de sismos, ordenados por tiempo (los más antiguos a la izquierda, los más recientes a la derecha) para los tres tensores de referencia. Las líneas verticales punteadas marcan el tiempo de cambio de esfuerzo. La línea color azul corresponde al desajuste calculado a partir del tensor de referencia de Ocampo & Sánchez (2014), la roja para los sismos seleccionados al E y la verde sismos al SE del CVCCN. (b) Gráfica del valor Z, las líneas horizontales punteadas indican los límites de significancia del cambio en el esfuerzo, siendo $Z = 1,96$ para el 95%, $Z = 2,57$ para el 99%.

Durante el período 10 octubre de 2013 - 20 de noviembre del 2014 la inversión relativamente estable ($F= 6,4^\circ$) de MF con el método FMSI indica que la orientación de esfuerzos principales, en formato acimut/inclinación, es σ_1 $278^\circ/14^\circ$ y σ_3 $165^\circ/57^\circ$ resultados que en general sugieren régimen de compresión triaxial ($R=0,4$), con estilo de fallamiento inverso. De manera similar, la inversión con el método LSIB para el mismo período indica $\sigma_1 = 288^\circ/18^\circ$, σ_3 $176^\circ/48^\circ$ y $\sigma^2 = 0,11$ (figura 6-7). Durante este tiempo, la actividad sísmica ocurrió principalmente al SW del volcán Chiles con algunos sismos alrededor del cono volcánico y uno en las inmediaciones del volcán Cumbal (figura 6-12a), las magnitudes (M_L) varían entre 0,0 y 3,0, y profundidades entre 0,0 km a 7,7 km.

Durante 21 de noviembre del 2014 - 26 de diciembre del mismo año, la inversión moderadamente estable ($F= 7,0^\circ$) con el método FMSI indica esfuerzos principales σ_1 y σ_3 de $355^\circ/43^\circ$ y $195^\circ/45^\circ$, respectivamente, con $R = 0,2$. Por otra parte, la inversión con el método LSIB indica $\sigma_1 = 309^\circ/35^\circ$, σ_3 $177^\circ/42^\circ$ y $\sigma^2 = 0,14$ (figura 6-8), indicando similarmente tipo de falla indeterminado (figura 6-8). Durante este período la actividad sísmica también se ubicó al SW del volcán Chiles (figura 6-12 b), las magnitudes (M_L) varían entre 0,0 y 2,5 y profundidades entre 2,8 km y 9,0 km

Durante el período 27 de noviembre de 2014 - 13 de diciembre del 2014 la inversión relativamente estable ($F = 6,6^\circ$) usando FMSI indica esfuerzos principales $\sigma_1 = 282^\circ/4^\circ$ y $\sigma_3 = 186^\circ/56^\circ$ y $R = 0,5$ (régimen compresivo triaxial) dominando el estilo de falla inverso. La inversión con LSIB indica $\sigma_1 = 81^\circ/9^\circ$, $\sigma_3 = 183^\circ/47^\circ$ y $\sigma^2 = 0,13$ (figura 6-9). Como en períodos anteriormente descritos, la sismicidad durante este tiempo se localizó principalmente al SW del volcán Chiles, con algunos sismos dispersos en el SE (figura 6-12 c), con magnitudes (M_L) entre 0,0 y 3,7 y profundidades entre 2,6 km y 8,7 km.

Los sismos registrados durante el 14 de diciembre del 2014 - 26 de agosto de 2015 presentan una inversión relativamente estable ($F = 6,5^\circ$) con régimen tectónico de extensión triaxial donde predomina el tipo de falla normal, la orientación de los esfuerzos principales acimut/inclinación por el método FMSI de σ_1 y σ_3 son $351^\circ/80^\circ$ y $175^\circ/10^\circ$ respectivamente, y $R = 0,7$. La inversión con LSIB indican $\sigma_1 = 278^\circ/28^\circ$, $\sigma_3 = 170^\circ/29^\circ$, y $\sigma^2 = 0,16$ (figura 6-10), durante este período la sismicidad se localiza al SW del volcán

Chiles, con sismos dispersos al SE (figura 6-12 d), las magnitudes varían (M_L) entre 0,0 a 3,87 y las profundidades entre 2,6 a 10,0 km.

Finalmente durante el período 27 de octubre de 2015 - 31 de diciembre de 2015 la inversión fue relativamente estable ($F = 6,6^\circ$), el método FMSI indica orientación de esfuerzos principales $\sigma_1 = 325^\circ/49^\circ$ y $\sigma_3 = 169^\circ/38^\circ$ con $R = 0,7$; de igual forma, la inversión por el método LSIB indica $\sigma_1 = 12^\circ/52^\circ$, $\sigma_3 = 215^\circ/36^\circ$ y $\sigma^2 = 0,13$, correspondientes a tipo de falla desconocido (figura 6-11). La sismicidad se encuentra localizada principalmente al SW y N del volcán Chiles, con algunos sismos dispersos ubicados al SE (figura 6-12 e), la magnitud (M_L) varía entre 0,0 y 2,6 y las profundidades entre 1,9 km a 15 km.

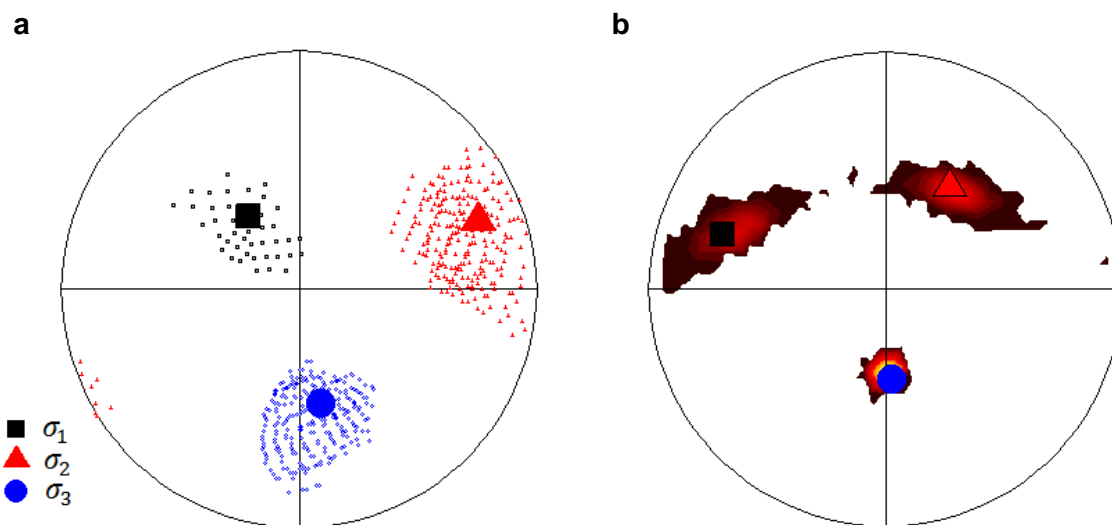


Figura 6-7: Proyección estereográfica de la dirección de esfuerzos principales estimada por la inversión de MF en función del tiempo durante el período 10 de octubre del 2013 - 20 de noviembre del 2014 usando los métodos (a) FMSI (Gephart y Forsyth, 1984) y (b) LSIB (Michael, 1984). Convenciones iguales a la figura 6-1

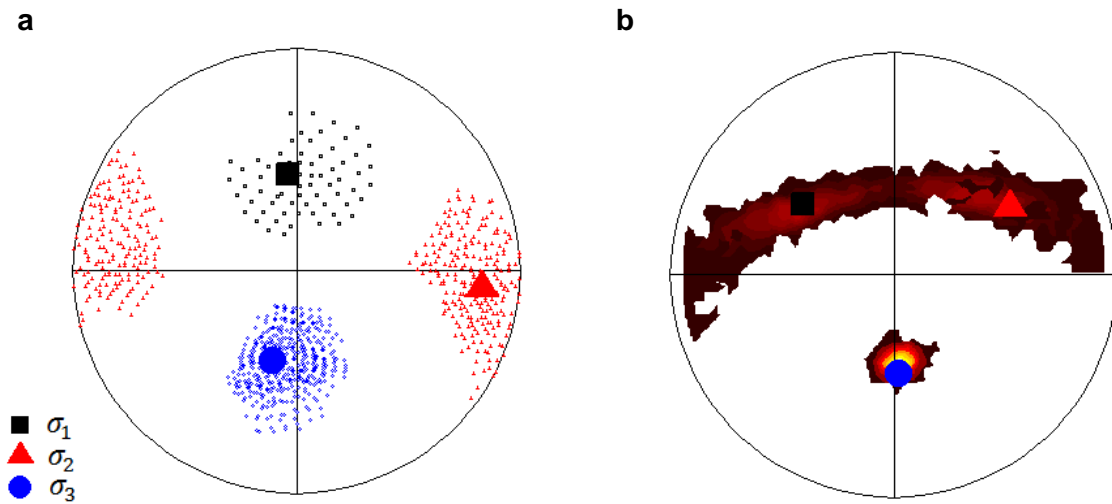


Figura 6-8: Proyección estereográfica de la dirección de esfuerzos principales estimada por la inversión de MF en función del tiempo durante el período 21 de noviembre del 2014 - 26 de noviembre del 2014 usando los métodos (a) FMSI (Gephart y Forsyth, 1984) y (b) LSIB (Michael, 1984). Convenciones iguales a la figura 6-1.

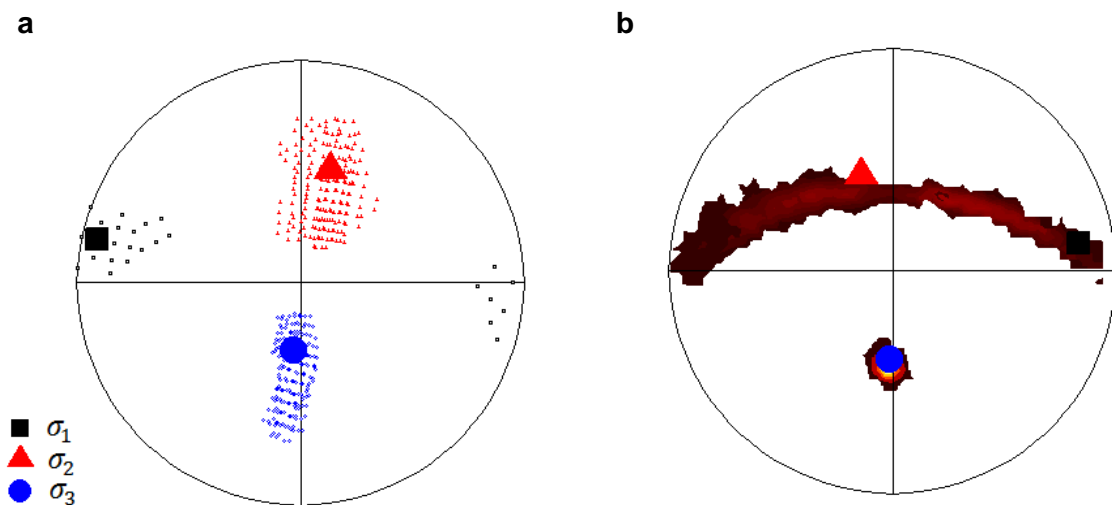


Figura 6-9: Proyección estereográfica de la dirección de esfuerzos principales estimada por la inversión de MF en función del tiempo durante el período 27 de noviembre del 2014 - 13 de diciembre del 2014 usando los métodos (a) FMSI (Gephart y Forsyth, 1984) y (b) LSIB (Michael, 1984). Convenciones iguales a la figura 6-1.

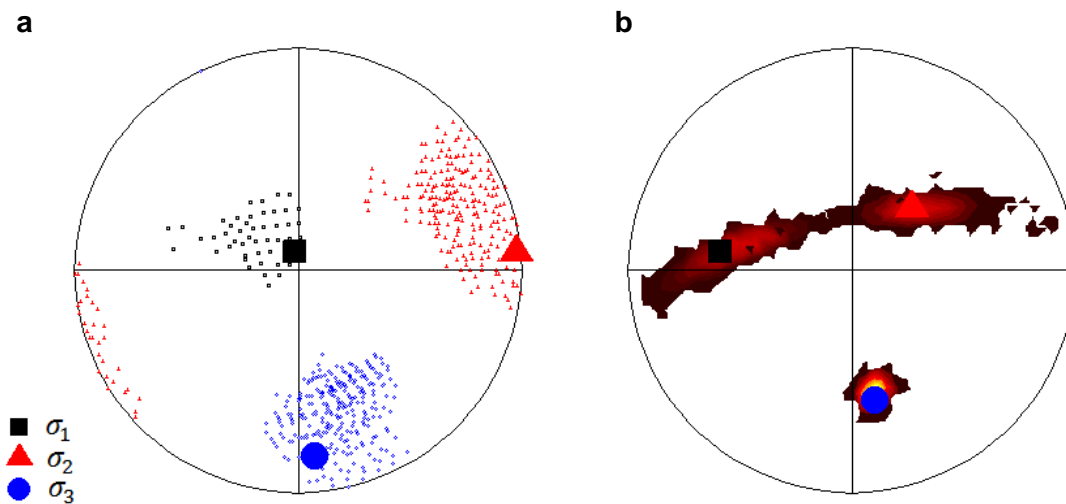


Figura 6-10: Proyección estereográfica de la dirección de esfuerzos principales estimada por la inversión de MF en función del tiempo durante el período 14 de diciembre del 2014 - 26 de Octubre del 2015 usando los métodos (a) FMSI (Gephart y Forsyth, 1984) y (b) LSIB (Michael, 1984). Convenciones iguales a la figura 6-1

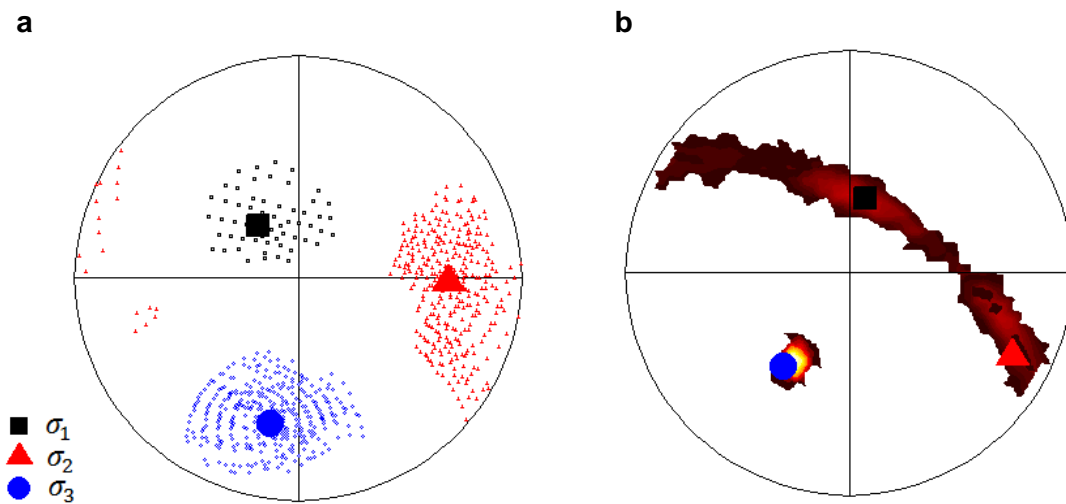
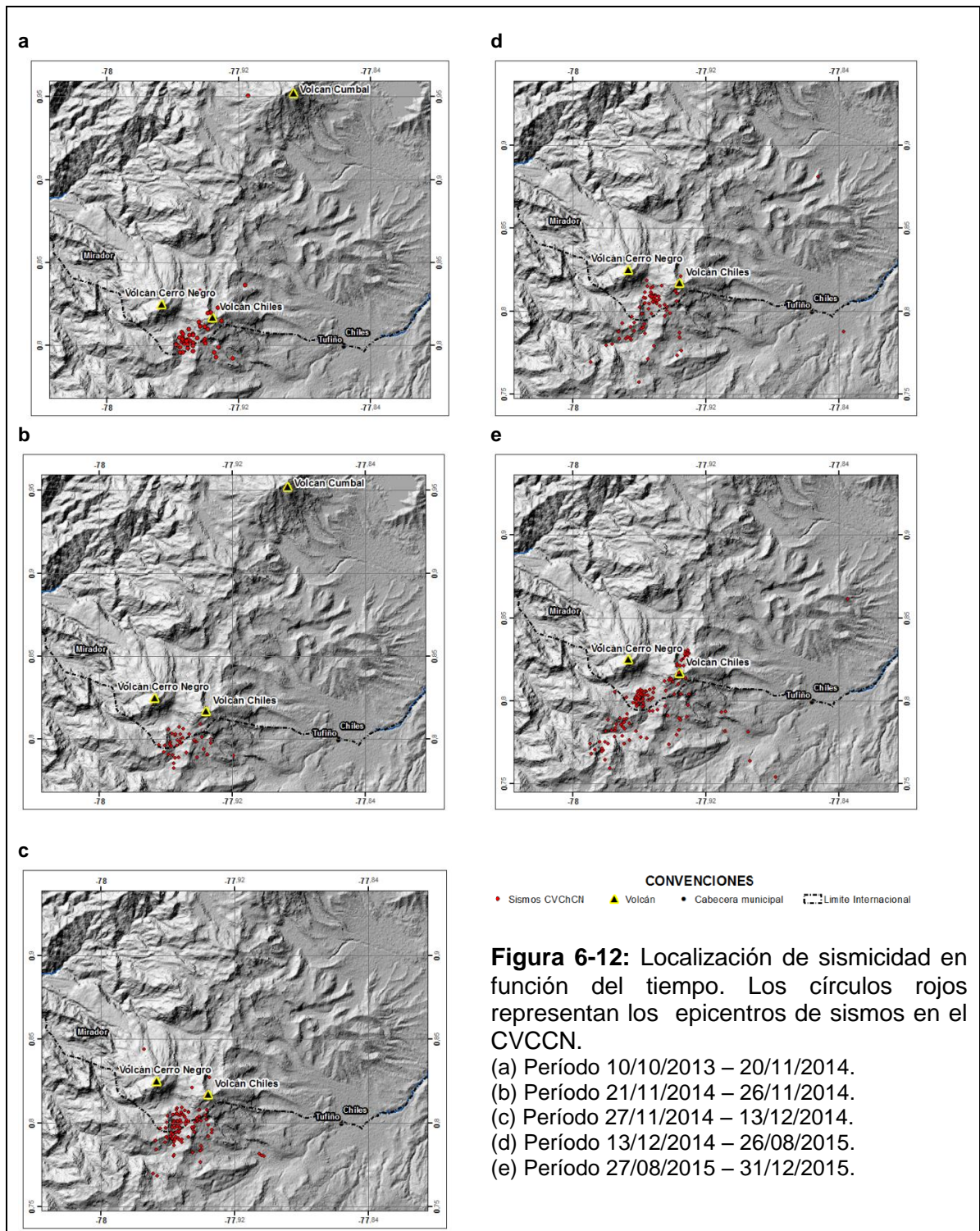


Figura 6-11: Proyección estereográfica de la dirección de esfuerzos principales estimada por la inversión de MF en función del tiempo durante el período 27 de Octubre del 2015 - 31 de diciembre del 2015 usando los métodos (a) FMSI (Gephart y Forsyth, 1984) y (b) LSIB (Michael, 1984). Convenciones iguales a la figura 6-1.



Con el fin de detectar posibles variaciones espaciales del esfuerzo, se realizó el análisis de desajuste acumulado en función de la profundidad, latitud, y longitud, comparando los tres tensores de referencia anteriormente mencionados (Tabla 6-1) y priorizando el resultado obtenido con el tensor de referencia calculado con la sismos localizados al E. Para los sismos ordenados por profundidad se encontraron límites en 3,5 km con una confianza de 99%, y en 4,5 km, 5,2 km y 6,0 km con 95% de confianza (Figura 6-13).

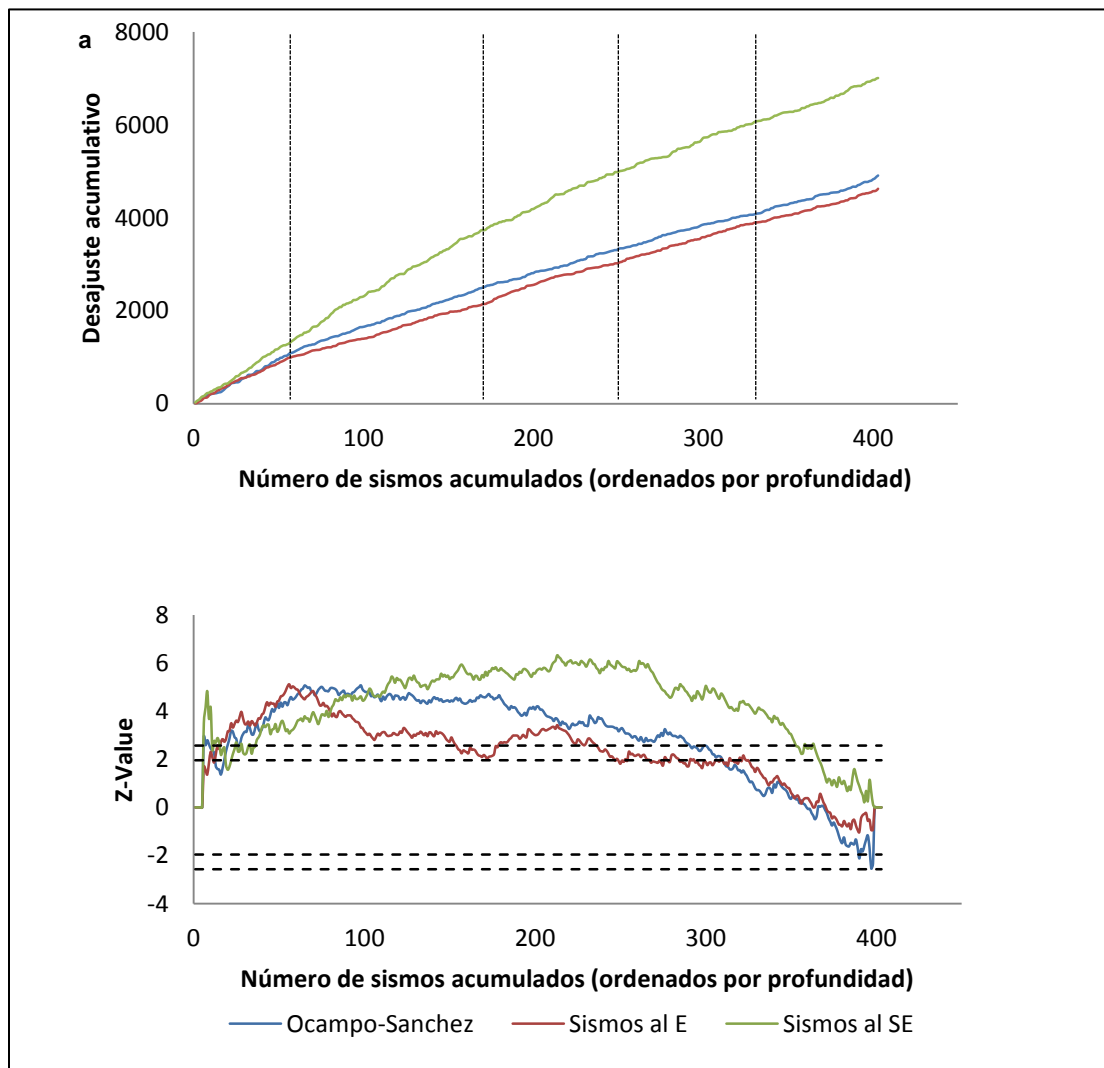


Figura 6-13: (a) Desajuste acumulativo vs. número de sismos, ordenados por profundidad (los más superficiales a la izquierda, los más profundos a la derecha) para los tres tensores de referencia. Las líneas verticales punteadas marcan el número de sismo (profundidad) en el cual se detecta un cambio de esfuerzo. (b) Gráfica del valor Z Convenciones como en la Figura 6-6.

En los sismos ordenados por longitud se detectaron límites usando el tensor de referencia de selección N-S en 77.957°W, 77.953°W, 77.943°W y 77.933°W, con un 99% de significancia (Figura 6-14).

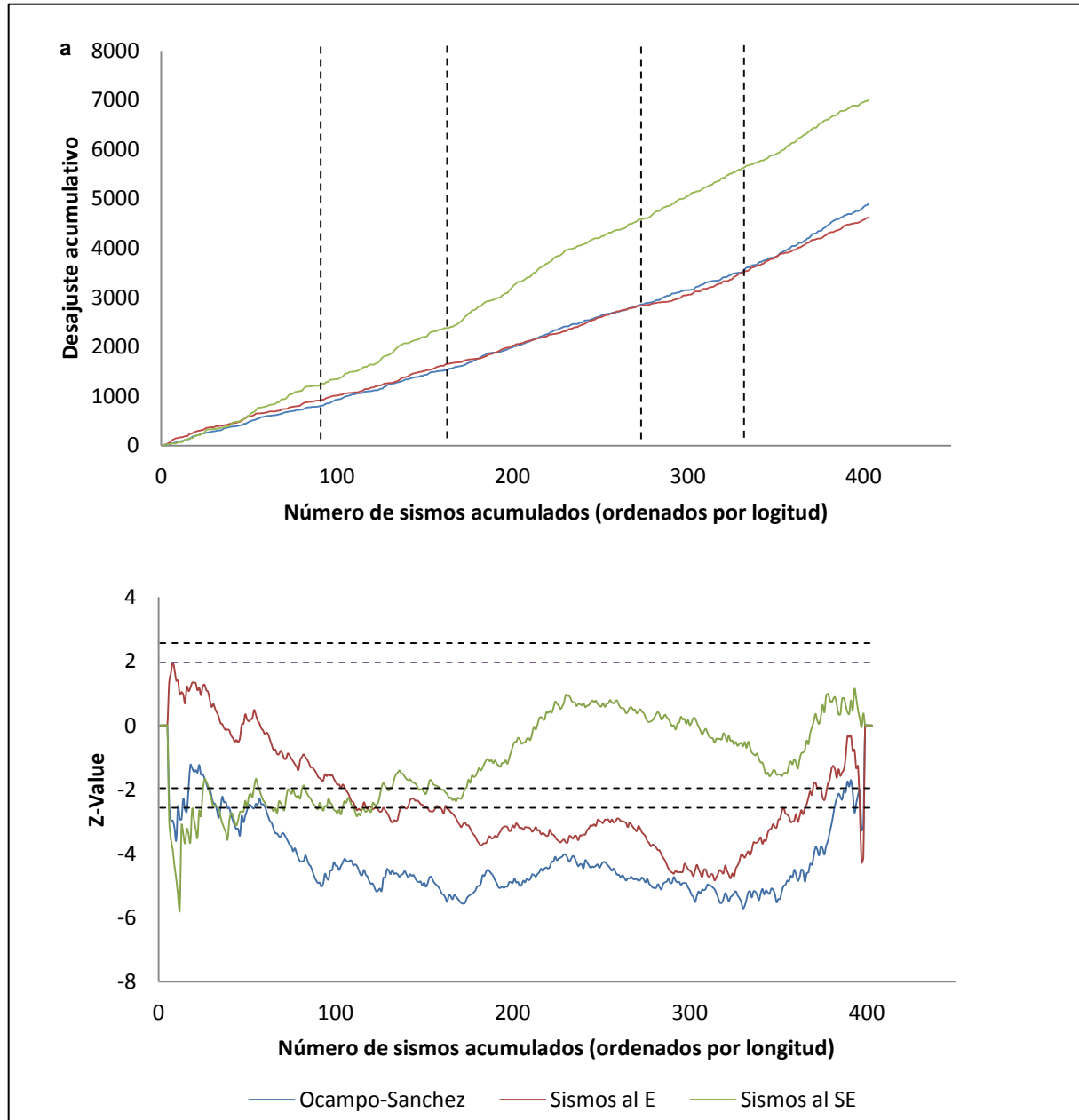


Figura 6-14: (a) Desajuste acumulativo vs. número de sismos, ordenados por longitud (los más occidentales a la izquierda, los más orientales a la derecha) para los tres tensores de referencia. Las líneas verticales punteadas marcan el número de sismo (longitud) en el que se detecta un cambio de esfuerzo. (b) Gráfica del valor Z. Convenciones como en la Figura 6-6.

Con los sismos ordenados por latitud, se detectaron límites usando los tensores de referencia de selección N-S y Ocampos & Sánchez (2014) a los $0,781^{\circ}\text{N}$, $0,795^{\circ}\text{N}$, $0,803^{\circ}\text{N}$ y $0,806^{\circ}\text{N}$ con un 99% de significancia (Figura 6-15).

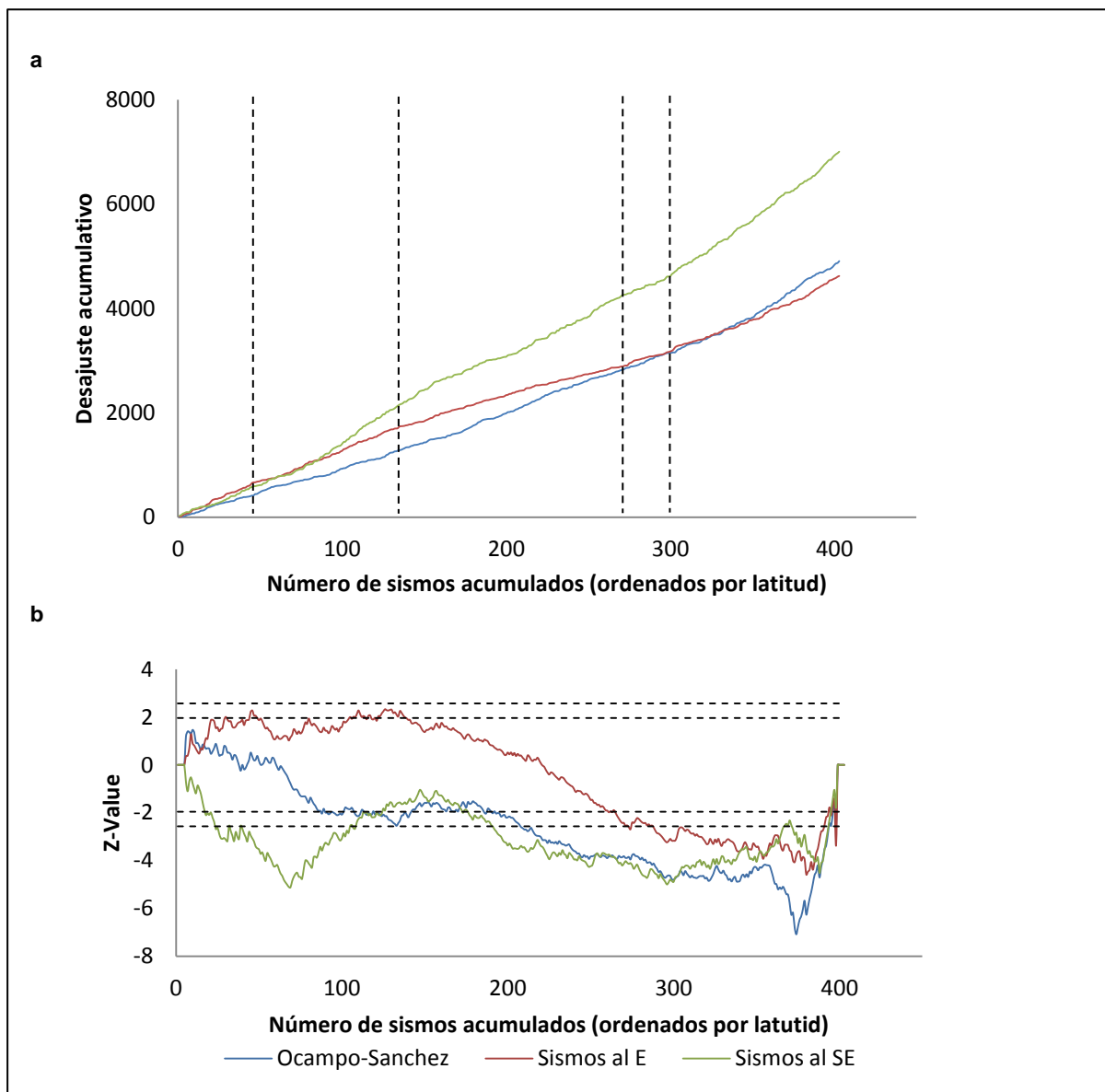


Figura 6-15: (a) Desajuste acumulativo vs. número de sismos ordenados por latitud (los ubicados más al sur a la izquierda, los más al norte a la derecha) para los tres tensores de referencia. Las líneas verticales punteadas marcan el número de sismo (latitud) en el que se detecta un cambio de esfuerzo. (b) Gráfica del valor Z. Convenciones como en la Figura 6-6.

Partiendo de los límites detectados con el análisis de desajuste acumulado, con los sismos ordenados de acuerdo a la profundidad, se resolvió el tensor de esfuerzos para cada subgrupo (Tabla 6-2 y Tabla 6-3). La solución para los sismos más superficiales (0,0 km a 3,5 km), localizados principalmente en el edificio del volcán Chiles, corresponde a un régimen de rumbo en dirección NWW-SEE, según los dos métodos, con $F = 9,4^\circ$ indicando heterogeneidad del esfuerzo en esta región (Figura 6-16). La inversión de MF para sismos a profundidades entre 3,5 km y 4,5 km, localizados al S del volcán Chiles, muestra un régimen compresivo en dirección NWW-SEE, con predominio de fallas inversas y $F = 7,3^\circ$ (Figura 6-17). Para los sismos localizados a profundidades entre los 4,5 km a 5,2 km y ubicados al SW del volcán Chiles, no fue posible asociar un régimen de esfuerzo particular (Figura 6-18). Los sismos entre 5,2 km y 6,0 km de profundidad, ubicados al SW del volcán Chiles, sugieren un régimen compresivo en dirección NWW-SEE con $F = 8,2$ (Figura 6-19). Finalmente, los sismos más profundos (6 km a 15,1 km), ocurrieron bajo un régimen homogéneo ($F = 6,0$) de extensión, donde predominan las fallas de tipo normal (Figura 6-20).

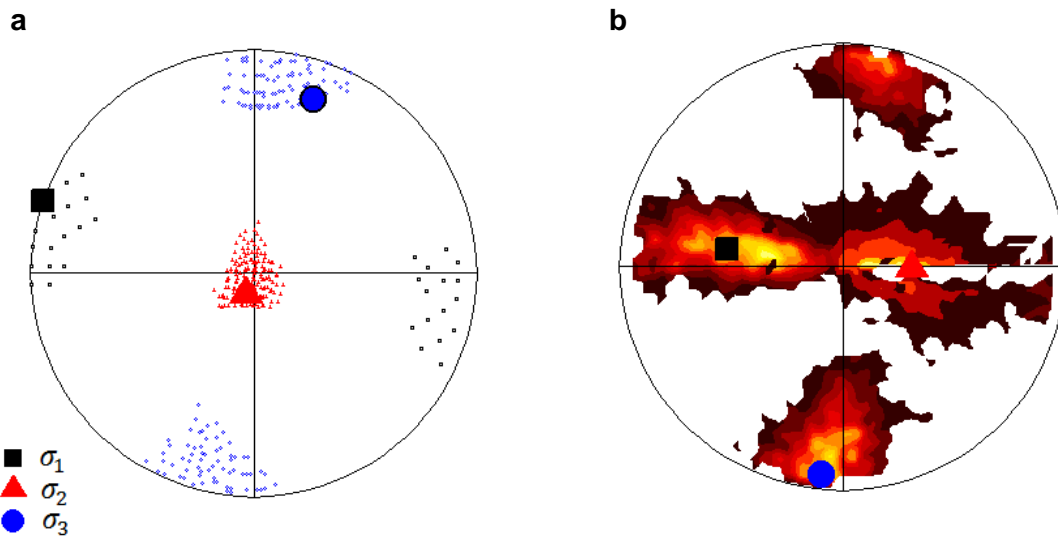


Figura 6-16: Proyección estereográfica de las direcciones de los esfuerzo principales calculados de los sismos entre 0,0 km a 3,5 km usando los métodos de (a) FMSI (Gephart y Forsyth, 1984) y (b) LSIB (Michael, 1984). Convenciones iguales a la figura 6-1.

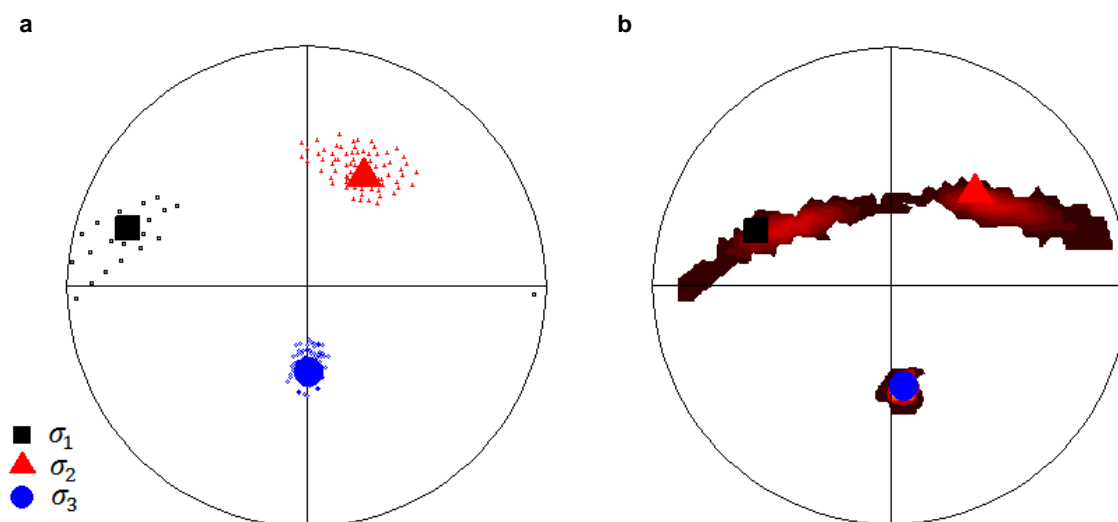


Figura 6-17: Proyección estereográfica de las direcciones de los esfuerzo principales calculados de los sismos entre 3,5 km a 4,5 km usando los métodos de (a) FMSI (Gephart y Forsyth, 1984) y (b) LSIB (Michael, 1984). Convenciones iguales a la figura 6-1.

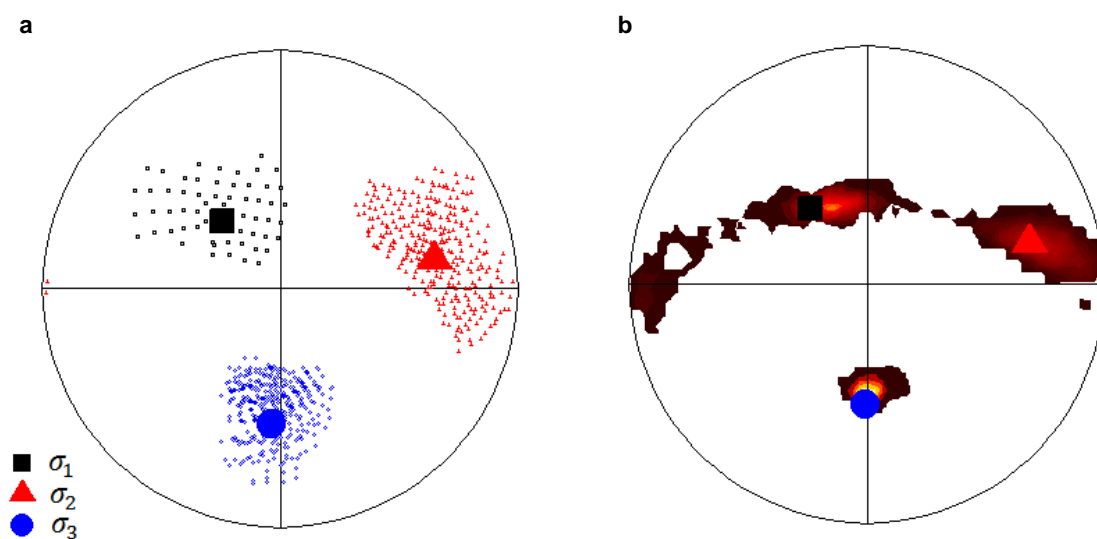


Figura 6-18: Proyección estereográfica de las direcciones de los esfuerzo principales calculados de los sismos entre 4,5 km a 5,2 km usando los métodos de (a) FMSI (Gephart y Forsyth, 1984) y (b) LSIB (Michael, 1984). Convenciones iguales a la figura 6-1.

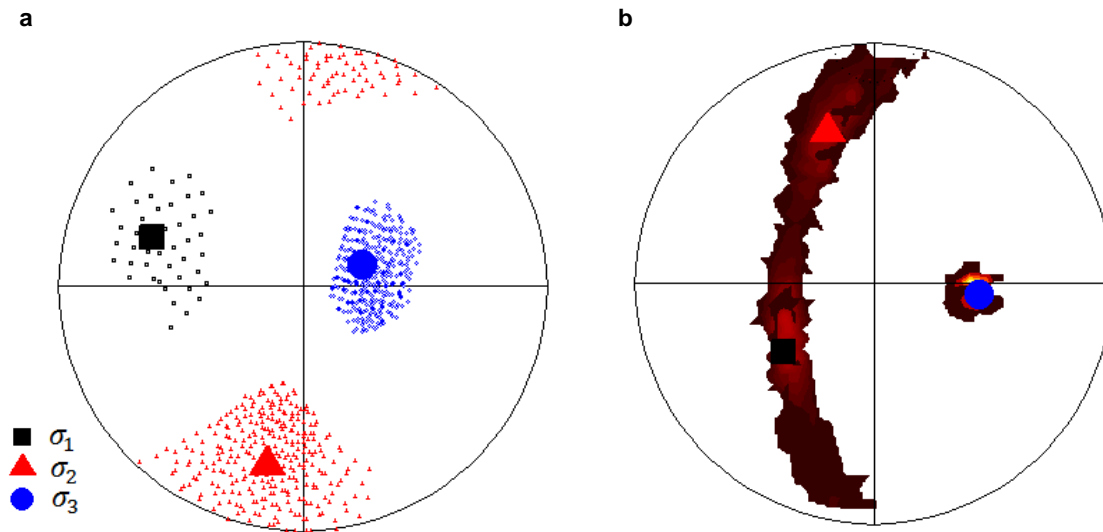


Figura 6-19: Proyección estereográfica de las direcciones de los esfuerzo principales calculados de los sismos entre 5,2 km a 6,0 km usando los métodos de (a) FMSI (Gephart y Forsyth, 1984) y (b) LSIB (Michael, 1984). Convenciones iguales a la figura 6-1.

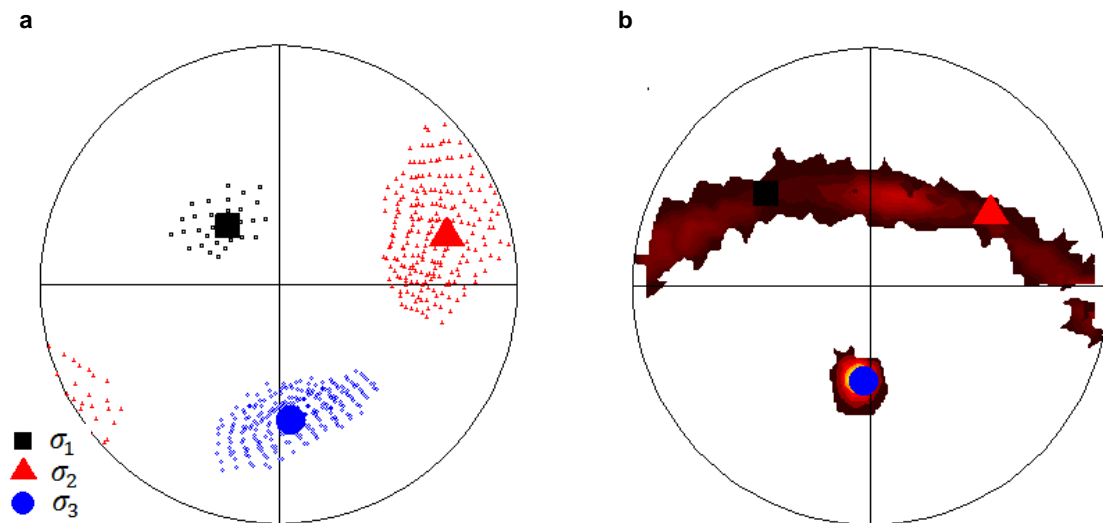


Figura 6-20: Proyección estereográfica de las direcciones de los esfuerzo principales calculados de los sismos entre 6,0 km a 15,1 km usando los métodos de (a) FMSI (Gephart y Forsyth, 1984) y (b) LSIB (Michael, 1984). Convenciones iguales a la figura 6-1.

Tabla 6-2: Resultados de la inversión para los subgrupos de MF por el método FMSI obtenidos de la gráfica de desajuste acumulados. Tiempo, profundidad, longitud y latitud. Se presentan los valores de acimut/inclinación de σ_1 , σ_2 y σ_3 , F y R para cada solución.

	Rango	# sismos	σ_1 (°)	σ_2 (°)	σ_3 (°)	F (°)	R	Estilo de falla
Tiempo (dd/mm/aaaa)	10/10/2013	52	278/14	17/29	165/57	6,4	0,4	Inversa
	20/11/2014							
	21/11/2014	38	355/43	95/10	195/45	7	0,2	Desconocido
	26/11/2014							
	27/11/2014	101	282/4	15/34	186/56	6,6	0,5	Inverso
	13/12/2014							
	13/12/2014	77	351/80	85/1	175/10	6,5	0,7	Normal
	26/08/2015							
27/08/2015	138	325/49	69/12	169/38	6,5	0,7	Desconocido	
31/12/2015								
Profundidad (km)	0,0 – 3,5	60	289/0	199/79	19/11	9,4	0,6	Rumbo
	3,5 – 4,5	114	288/14	28/35	179/51	7,3	0,5	Inverso
	4,5 – 5,2	80	319/49	79/23	184/31	7,4	0,5	Desconocido
	5,2 – 6,0	72	288/24	191/17	69/61	8,2	0,7	Inverso
	6,0 – 15,1	80	319/54	74/17	175/31	6,0	0,6	Normal
Longitud (°)	77,989°W	114	316/48	80/27	187/30	7	0,6	Desconocido
	77,957 W							
	77,957 W	69	356/36	255/15	146/50	7,3	0,7	Inverso
	77,953 W							
	77,953 W	107	283/10	19/31	177/57	6,7	0,3	Inverso
	77,943 W							
	77,943 W	67	82/12	348/15	207/71	7,4	0,2	Inverso
	77,933 W							
77,933 W	46	353/6	257/43	90/46	7,7	0,3	Desconocido	
77,834 W								
Latitud (°)	0,717 N							
	0,781 N	46	314/49	87/31	193/24	7,5	0,6	Desconocido
	0,781 N							
	0,795 N	89	81/19	315/59	179/23	7,0	0,6	Rumbo
	0,795 N							
	0,803 N	137	308/19	51/34	194/50	6,6	0,3	Inverso a rumbo
	0,803 N							
	0,806 N	33	354/52	256/6	162/37	4,2	0,4	Desconocido
0,806 N								
0,806 N	100	291/11	163/73	23/13	7,7	0,6	Rumbo	
0,950 N								

Tabla 6-3: Resultados de la inversión para los subgrupos de MF por el método LSIB obtenidos de la gráfica de desajuste acumulados. Tiempo, profundidad, longitud y latitud. Se presentan los valores de acimut/inclinación de σ_1 , σ_2 y σ_3 , y σ^2 para cada solución.

	Rango	# sismos	σ_1 (°)	σ_2 (°)	σ_3 (°)	$\bar{\beta}$	Estilo de falla
Tiempo (dd/mm/aaaa)	10/10/2013	52	279/34	90/55	187/4	0,11	Rumbo
	20/11/2014						
	21/11/2014	38	218/35	330/27	87/42	0,14	Desconocido
	26/11/2014						
	27/11/2014	101	203/17	304/35	89/50	0,097	Rumbo
	13/12/2014						
	13/12/2014	77	193/48	323/30	69/26	0,16	Desconocido
	26/08/2015						
	27/08/2015	138	244/38	350/18	99/45	0,16	Desconocido
	31/12/2015						
Profundidad (km)	0,0 – 3,5	60	279/34	90/55	187/4	0,3	Rumbo
	3,5 – 4,5	114	293/27	42/33	172/44	0,15	Inverso
	4,5 – 5,2	80	396/46	75/20	181/36	0,13	Desconocido
	5,2 – 6,0	72	234/39	344/23	95/42	0,17	Desconocido
	6,0 – 15,1	80	312/29	59/28	185/47	0,11	Desconocido
Longitud (°)	77,989°W	114	334/48	85/18	189/36	0,14	Desconocido
	77,957°W						
	77,957°W	69	319/39	58/12	163/49	0,14	Desconocido
	77,953°W						
	77,953°W	107	285/19	31/40	174/43	0,11	Inverso a rumbo
	77,943°W						
	77,943°W	67	92/1	2/52	183/38	0,22	Inverso a rumbo
	77,933°W						
	77,933°W	46	320/36	212/23	96/44	0,26	Desconocido
	77,834°W						
Latitud (°)	0,717°N	46	16/66	108/1	200/23	0,15	Normal
	0,781°N						
	0,781°N	89	62/26	308/39	176/38	0,14	Desconocido
	0,795°N						
	0,795°N	137	295/17	38/37	185/47	0,096	Inverso a rumbo
	0,803°N						
	0,803°N	33	313/41	58/16	165/43	0,21	Desconocido
	0,806°N						
	0,806°N	100	284/29	42/40	170/35	0,28	Desconocido
	0,950°N						

Al ordenar los sismos de acuerdo a su coordenada de longitud, los sismos pueden ser separados en cinco regiones: la región más occidental, entre 77,989°W y 77,957°W exhibe régimen de esfuerzo indeterminado, aunque podría ser extensivo, debido a que σ_1 tiende a ser sub-vertical ($\geq 40^\circ$ de inclinación); las regiones entre 77,957°W - 77,953°W, 77,953°W - 77,943°W y 77,943°W - 77,933°W con σ_1 subhorizontal, presentan un régimen compresivo cercano a N-S, NWW-SEE y NEE-SWW respectivamente y la región 77,933°W - 77,834°W, presentan un régimen desconocido con σ_2 y σ_3 sub-vertical y con σ_1 horizontal (Tabla 6-2 y Tabla 6-3) (Figura 6-21).

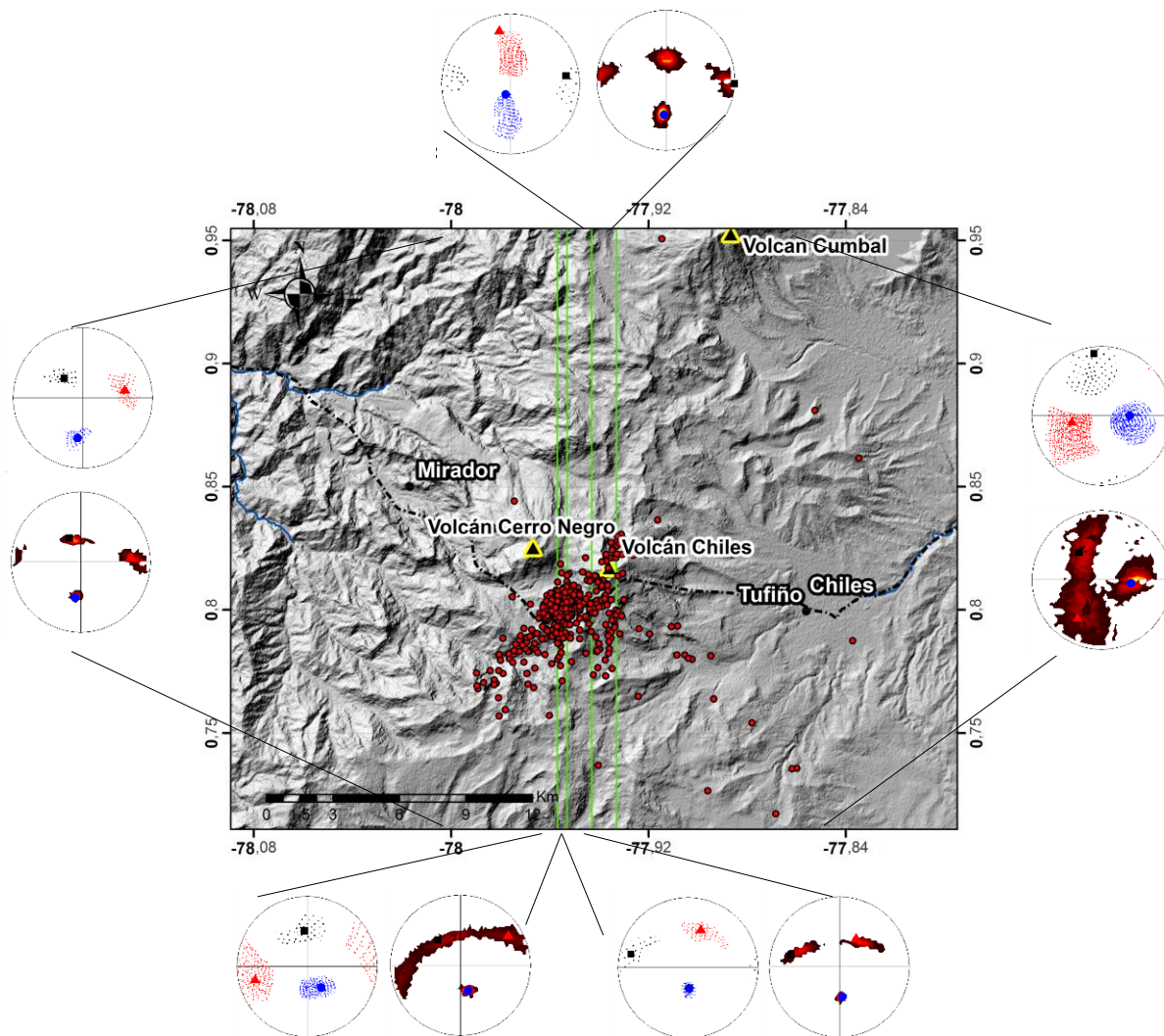


Figura 6-21: Mapa del área de estudio con los modelos de esfuerzo en función de la longitud utilizando los métodos de inversión de FMSI (Gephart y Forsyth, 1984) y LSIB (Michael, 1984). Los círculos rojos corresponden a los sismos registrados, convenciones de las proyecciones estereográficas iguales a la figura 6-1.

Al analizar los sismos ordenados por latitud se pueden definir cinco zonas: la primera, ubicada más al sur entre $0,717^{\circ}\text{N}$ y $0,781^{\circ}\text{N}$ presenta un régimen indeterminado, con inclinaciones de σ_1 , σ_2 , y σ_3 entre 20° y 44° , la segunda entre $0,781^{\circ}\text{N}$ y $0,795^{\circ}\text{N}$ presenta un régimen de rumbo con σ_1 sub-horizontal y orientado NEE-SWW y σ_2 sub-vertical, la tercera zona, ubicada entre las coordenadas $0,795^{\circ}\text{N}$ y $0,803^{\circ}\text{N}$, con σ_1 sub-horizontal, en dirección NW-SE y σ_2 y σ_3 con inclinación cercana a los 45° , presenta un régimen compresivo con estilo de falla entre inverso y rumbo. La cuarta zona, ubicada

entre 0,803°N y 0,806°N presenta un régimen de esfuerzos indeterminados con inclinación de σ_1 , y σ_3 cercana a los 45°. Finalmente la zona más norte, entre 0,806°N y 0,950°N donde σ_1 y σ_3 tiende a ser horizontal y σ_2 es sub-vertical presenta un régimen de rumbo (Tabla 6-2 y Tabla 6-3) (Figura 6-22).

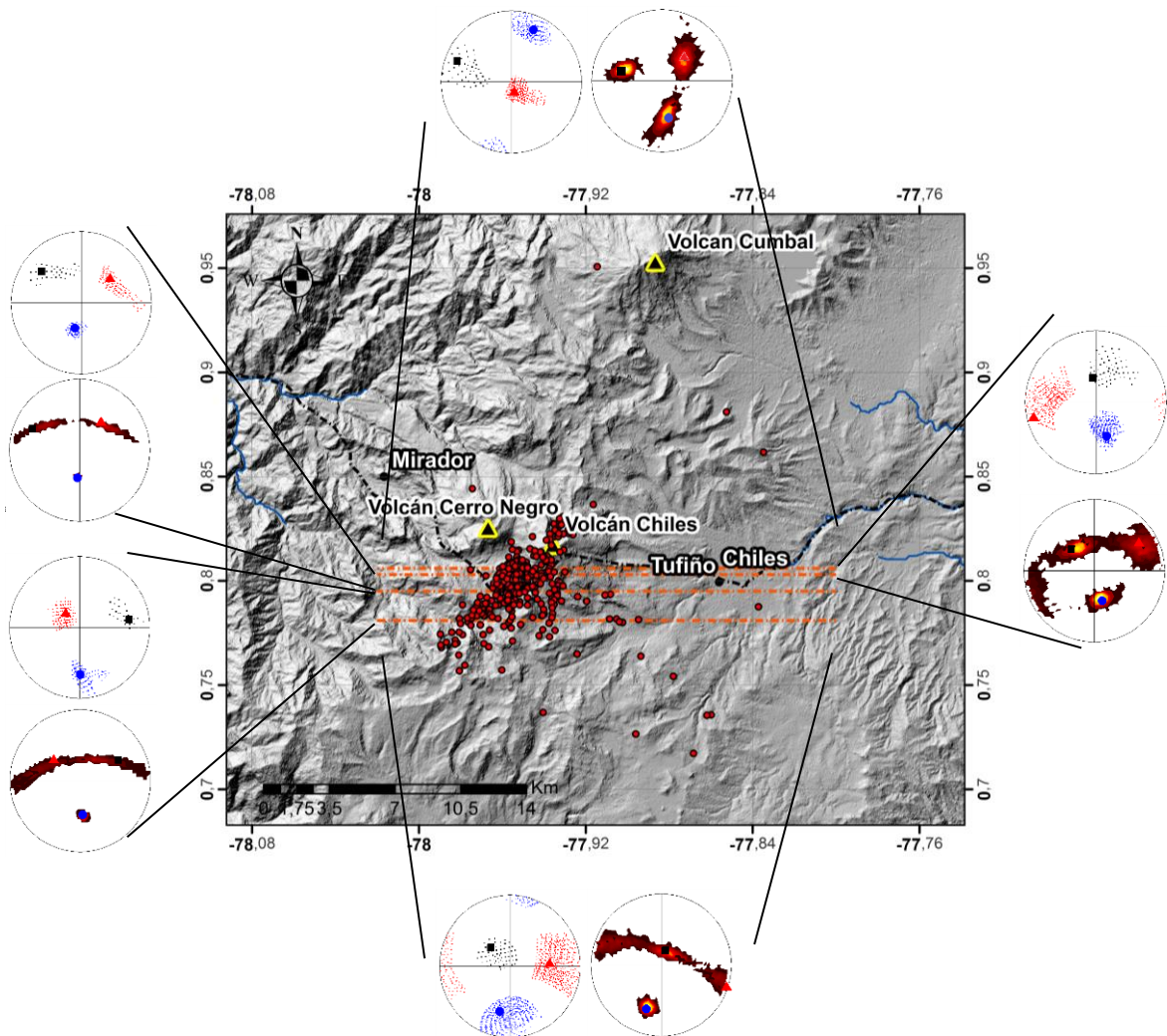


Figura 6-22: Mapa del área de estudio con los modelos de esfuerzo en función de la longitud utilizando los métodos de inversión de FMSI (Gephart y Forsyth, 1984) y LSIB (Michael, 1984). Los círculos rojos corresponden a los sismos registrados, convenciones de las proyecciones estereográficas iguales a la figura 6-1.

6.2 Discusión

En esta sección se analizan los resultados, las limitaciones del estudio y se extraen elementos de comparación de resultados con estudios realizados en otros volcanes.

6.2.1 Limitación de los resultados.

El presente estudio fue realizado para el período actividad sísmica 2013 – 2015 del CVCCN. La identificación de cambios de régimen de esfuerzo al inicio del primer enjambre en 2013 no fue posible debido a que durante este tiempo, la red monitoreo del CVCCN contaba con pocas estaciones, reduciendo la cobertura acimutal de los sismos localizados que, adicionalmente, no cumplían con buenos parámetros de calidad para ser incluidos en el cálculo de MF. Otro inconveniente detectado, es que el muestreo de los sismos a lo largo del tiempo no es regular, y los datos de mayor calidad están concentrados principalmente entre octubre de 2014 – enero de 2015 y junio de 2015 – diciembre 2015, por lo que no hay muestreo homogéneo de MF durante los tres años de estudio. Este inconveniente es insalvable debido a la naturaleza misma de las crisis sísmicas en volcanes, que tienden a aglomerar la actividad temporalmente. Sin embargo al seleccionar los mejores registros sísmicos disponibles, se puede demostrar confiabilidad con los datos usados.

Mediante el método de desajuste acumulado (Figuras 6-6, 6-13, 6-14 y 6-15) se pueden identificar segmentos en las curvas (subregiones o períodos de eventos vecinos) con errores similares y por lo tanto, estados de esfuerzos similares. Sin embargo, no todos los segmentos identificados generan resultados de inversión estable debido a la dificultad de selección de subgrupos homogéneos, lo que resulta en valores de F altos. En el presente estudio se compararon todos los MF con tres tensores de referencia diferentes con el fin de identificar posibles cambios de pendiente en los mismos sismos, en función del tiempo y el espacio, encontrándose que el tensor de referencia de Ocampo & Sánchez y el calculado con los sismos localizados al E del CVCCN, presentan algunas similitudes en los cambios de pendiente (algunos cambios son desplazados un par de sismos a la derecha o izquierda), mientras el calculado con los sismos localizados al SW

del CVCCN mostraba menos cambios en común con los otros tensores de referencia, esto demuestra que no todos los tensores de referencia son igual de eficientes para detectar los cambios en el esfuerzo de la región.

De acuerdo a la metodología seguida, la confiabilidad de las inversiones está muy relacionada al valor promedio del desajuste encontrado; (Sánchez et al., 2004; Yang, Y.-R., 2003) resultados con $F \geq 9^\circ$ son pocos confiables ya que la suposición de una región con campo de esfuerzo homogéneo no está siendo cumplida, por lo tanto, las inversiones realizadas en el estudio exhiben confiabilidades variables. Por ejemplo, en el análisis de variación del esfuerzo en función de la profundidad, se encontró un subgrupo de MF en los primeros 3,5 km con un $F = 9,4^\circ$, indicando heterogeneidad en esta zona. En general, las inversiones realizadas para determinar esta variación (en función de la profundidad), presentaron desajustes mayores (predominantemente $\geq 8,2^\circ$), valores que posiblemente reflejan variación del estado de esfuerzo en función de los otros parámetros, como latitud y longitud (Figura 6-23).

No obstante, en algunos sectores fue posible identificar regímenes de esfuerzo: moderadamente homogéneo ($F \leq 7,7^\circ$), relativamente homogéneo ($F \leq 6,5^\circ$), y homogéneo ($F \leq 6,0^\circ$) en función del tiempo y el espacio. Según Lu et al. (1997), los valores de desajuste entre $4,0^\circ$ y $6,0^\circ$ indicativos de régimen de esfuerzo homogéneo, incluyen entre 10% y 15% de errores aleatorios en los MF, por lo tanto solo dos subgrupos de datos están conformados por MF con errores aleatorios bajos, mientras que la mayoría de subgrupos presentan errores aleatorios intermedios y un subgrupo alto. Los errores en los MF pueden atribuirse a las limitaciones en la localización de los eventos, ya que durante el período de estudio (años 2013 – 2015), se completó la instalación de la red de monitoreo del CVCCN a partir del incremento de sismicidad a finales del 2013.

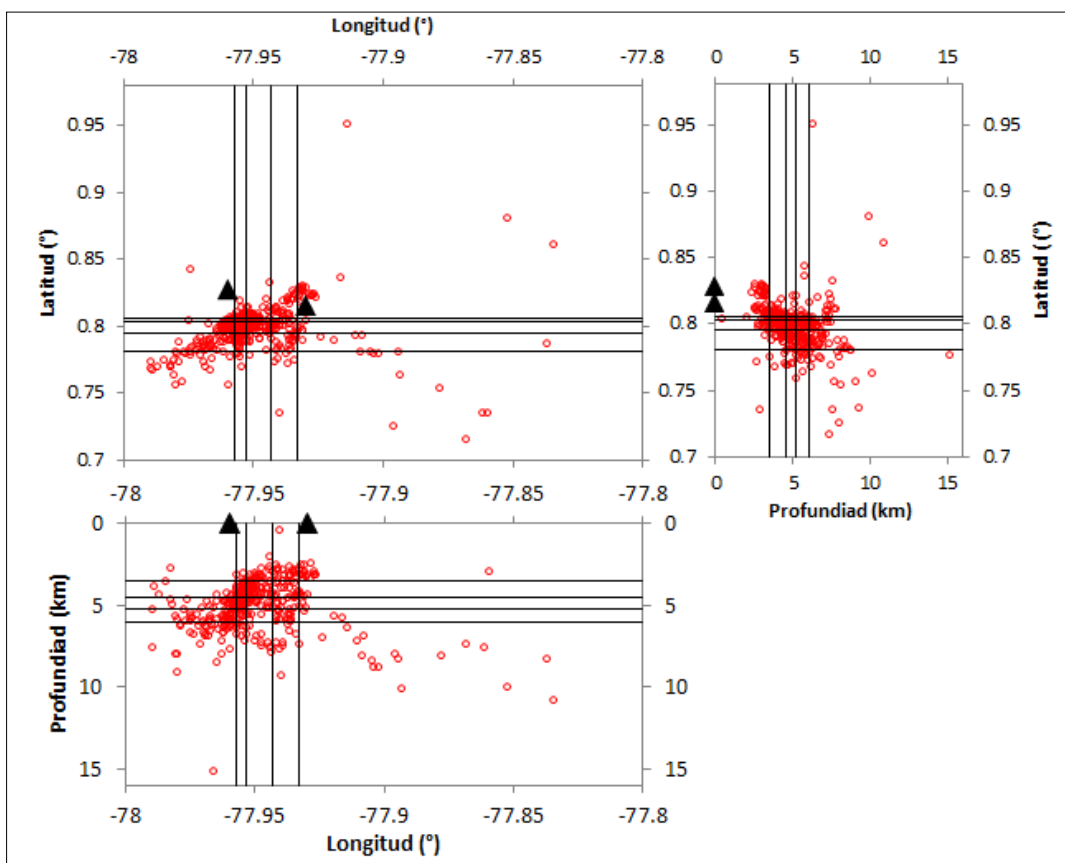


Figura 6-23: Mapa y perfiles N-S y E-W de los sismos del CVCCN durante el período 2013 – 2015 mostrando los límites de régimen de esfuerzo en el espacio (ver también figuras 6-13, 6-14 y 6-15). Los círculos rojos corresponden a los sismos, los triángulos negros a los volcanes Chiles y Cerro Negro y las líneas negras a los límites entre regiones con diferentes estados de esfuerzo encontrados.

6.2.2 Relación del estado de esfuerzo en función del tiempo y el espacio con la actividad en el CVCCN

Durante el período 2013 – 2015, en el CVCCN se han presentado incrementos de actividad sísmica o enjambres sísmicos, según el SGC-OVSP y IGEPN durante septiembre de 2013 a enero de 2014 se registró un primer enjambre sísmico en el CVCCN (Figura 6-24), posteriormente, se presentó un segundo incremento de actividad sísmica a partir de mediados de febrero de 2014 hasta julio de 2014 (Figura 6-24), estos enjambres se caracterizan por tener una distribución aleatoria de magnitudes y estar localizados al S del volcán Chiles, con algunos sismos dispersos localizados al N.

Desde el 29 de septiembre del 2014 hasta marzo 2015 se registró un nuevo incremento de actividad sísmica (Figura 6-24), en este enjambre se presentó el sismo de mayor magnitud (20 octubre de 2014, $M_L = 4,9$), a partir de finales de marzo de 2015 hasta diciembre de 2015, se evidencia un descenso de la actividad sísmica, con un pico de incrementó en el mes de junio de 2015.

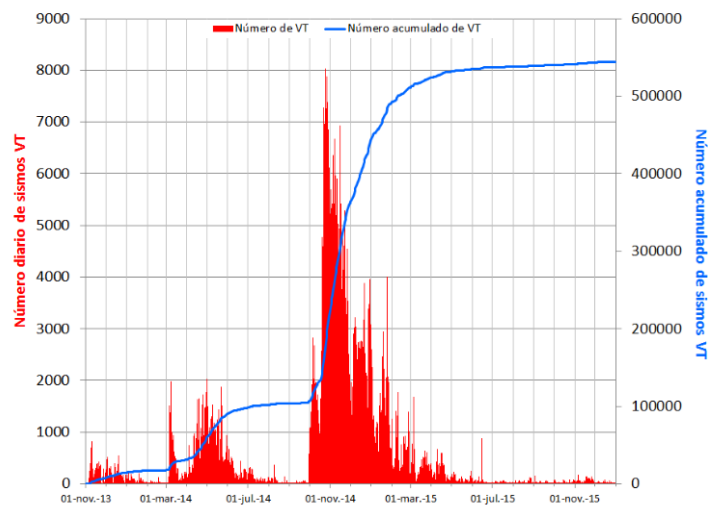


Figura 6-24: Número diario y acumulado de sismos VT, ocurrido en el CVCCN durante el período 2013 - 2015. Tomado de SGC-OVSP (2016).

Mediante el método de desajuste acumulado se identificaron cinco períodos donde ocurren cambios en la orientación del estado de esfuerzo (Tabla 6-2). En el primer período (10 de octubre 2013 – 20 de noviembre de 2014), se incluyen los primeros dos enjambres sísmicos y los primeros dos meses del tercer enjambre, cuando predomina el estilo de falla inversa con el esfuerzo principal σ_1 en orientación horizontal y σ_3 sub-vertical, durante el muy breve segundo período (21 de noviembre 2014 – 26 de noviembre de 2014), caracterizado por un leve decremento en la sismicidad, se observa una rotación de 45° en la orientación de σ_1 y σ_3 , En el tercer período (27 de noviembre de 2014 – 13 de diciembre 2014) el tensor de esfuerzo vuelve a rotar a una posición similar a la encontrada durante los primeros dos enjambres donde σ_1 muestra una orientación horizontal y σ_3 sub-vertical, en este lapso de tiempo se observa un incremento de sismicidad en el tercer enjambre. Ebmeier et al. (2016) plantean, con base en datos de geodesia terrestre y satelital, el emplazamiento de un silo o dique en la corteza media ($>13\text{km}$) para satisfacer la baja magnitud de los desplazamientos hacia arriba de los GPS.

Durante el cuarto período (13 de diciembre de 2014 – 26 de octubre de 2015), un tiempo de baja sismicidad culminando el tercer enjambre, la orientación de σ_1 es sub-vertical y σ_3 sub-horizontal mostrando un predominio de fallas de tipo normal, señala un cambio mayor en el estado de esfuerzo, que puede ser debida a la intrusión de magma. Finalmente durante el quinto período (27 de agosto de 2015 – 31 de diciembre de 2015) los ejes mayor y menor de esfuerzo se tratan de estabilizar: σ_1 y σ_3 pasa a una orientación de casi 45° en dirección NW-SE y S-N respectivamente. De lo anterior, se puede interpretar que la mayor parte del tiempo, los enjambres sísmicos están influenciados por el esfuerzo tectónico regional ya que no se observa una rotación significativa de los ejes de esfuerzo, exceptuando el cuarto período cuando los efectos locales dominan, durante el posible ascenso y emplazamiento de material magmático en la culminación del tercer enjambre del CVCCN.

Para los sismos más someros (< 3,5 km) no fue posible determinar una orientación de esfuerzo confiable debido a heterogeneidad en el estado del esfuerzo ($F = 9,4^\circ$), los sismos entre 3,5 km y 6,0 km presentan una orientación σ_1 sub-horizontal donde predominan las fallas de tipo inversas y de rumbo, consistentes con esfuerzos tectónicos, mientras que en los más profundos (6,0 km – 15,0 km) σ_1 es sub-vertical y σ_3 sub-horizontal, lo que sugiere que a esta profundidad la máxima compresión actúa en la vertical, un efecto posiblemente asociado a la presión ejercida por la cámara magmática y fluidos hidrotermales (Figura 6-25), en concordancia con lo esperado en el modelo esquemático propuesto por Ebmeier et al., (2016) para los sismo registrados en CVCCN durante el 01 al 19 de Octubre de 2014 .

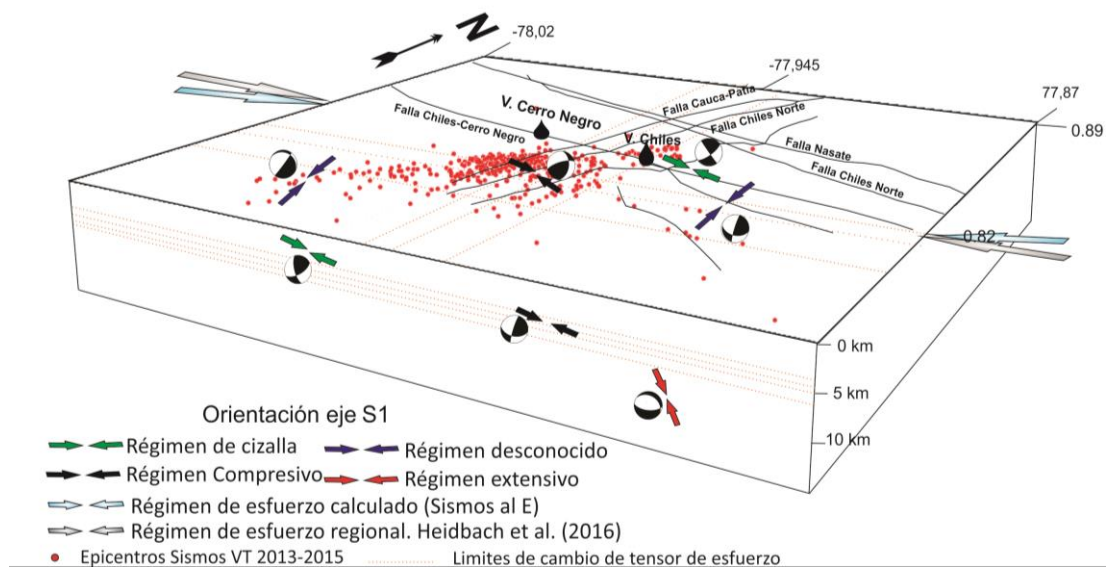


Figura 6-25: Modelo esquemático de la variación del esfuerzo en función de la latitud, longitud y profundidad. Las líneas de punteadas de color naranja representan los límites de cambio de tensor de esfuerzo encontrados con el método de desajuste acumulado, los puntos rojo representan el epicentro de los sismos VT durante el periodo 2013-2015, las flechas indican la orientación del eje σ_1 y sus colores representa el estilo de régimen (negro: régimen compresivo, verde: régimen de cizalla, azul: régimen desconocido, rojo: régimen extensivo), las flechas de color azul y gris claro representa en régimen de esfuerzo calculado con los sismo ubicado al E del CVCCN y régimen de esfuerzo regional calculado por Heidbach et al. (2016).

Menand et al. (2010) plantean que la rotación de un dique para forma un silo ocurre en regiones donde el esfuerzo compresivo es alto, la boyanza efectiva es menor o se presenta heterogeneidades en las rocas circundantes debido a que el contraste de la reología de rocas dúctiles y estratos adyacentes puede detener la alimentación de los diques y promover formación de silos en capas dúctiles debido a que estas zonas relajan parcialmente el esfuerzo desviatorio, si el volumen inyectado es poco en comparación con el esfuerzo compresivo horizontal, este esfuerzo se opone al avance vertical de las fracturas y las fuerza a modificar su trayectoria en planos horizontales evitando que el dique arribe a la superficie y generando la formación de silos. Teniendo en cuenta lo anterior, la evolución temporal y espacial de los esfuerzos en el CVCCN pueden indicar el emplazamiento de un silo durante los primeros tres períodos y el quinto período en los que se observa cambios de esfuerzos (10 de octubre 2013 – 20 de noviembre 2014, 21 de noviembre 2014 – 26 de noviembre 2014, 27 de noviembre 2014 - 13 de diciembre

2014 y 27 de agosto 2015 – 31 de diciembre 2015) y a una profundidad $\leq 6,0$ km debido a que los esfuerzos tectónicos compresivos obstaculizan el avance del material magmático inyectado y la geología de la zona que está compuesta principalmente por secuencias de basaltos, diabasas y flujos de lava fracturadas facilitan el emplazamiento en capas horizontales por la presencia de zonas de debilidad, durante el período comprendido entre 13 de diciembre de 2014 – 26 agosto de 2015 y profundidad $>6,0$ km donde hay un cambio de esfuerzo a régimen extensivo, puede ocurrir la expansión de un dique que posiblemente esta alimentado el silo o su crecimiento en la vertical como se observa en la figura 6-26 en el esquema explicativo de Sigurdsson et al., (2015).

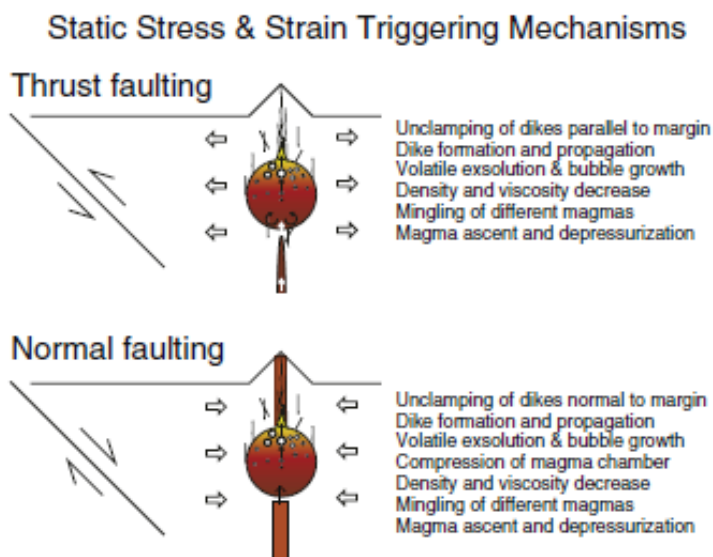


Figura 6-26: Mecanismos para el desencadenamiento de erupciones volcánicas por sismos. Sistemas magmáticos y tectónicos no a escala. Tomado de Sigurdsson et al., (2015)

Las curvas de desajuste acumulado en función de la distancia a los centros volcánicos (latitud y longitud) muestran que en la región más sureña, entre $0,717^\circ$ N - $0,781^\circ$ N, y más occidental, entre $77,989^\circ$ W – $77,957^\circ$ W, del CVCCN, σ_1 presenta una tendencia sub-vertical con estilo de falla indeterminado, quizá con tendencia a fallas normales, mientras que en el resto de la región presenta una orientación sub-horizontal, dominando el tipo de fallas inversas y de rumbo como respuesta al régimen compresivo que domina en la tectónica de la región (Figura 6-25).

6.2.3 Comparación de resultados con otros estudios

En muchos volcanes del mundo se han modelado cambios en el esfuerzo local generados por el ascenso de magma presurizado, como en el volcán Monte Unzen, Japón (Umakosi et al., 2001), Redoubt, Alaska (Sánchez et al., 2004), Ruapehu, Nueva Zelanda (Gerst & Savage, 2004; Gerts 2003), Popocatepetl, México (Arámbula-Mendoza, et al., 2010), Monte St. Helens, USA (Musumeci et al., 2000), y Monte Ontake, Japón (Terakawa et al., 2016) entre otros. En estos volcanes se observan rotaciones de los ejes de esfuerzo que son consistentes con la inflación o el crecimiento de un dique por lo que estos estudios pueden ser utilizados para el seguimiento y entendimiento de señales indicativas de erupción, aunque es necesario, cuantificar el campo de esfuerzo local y la presión ejercida por el ascenso del magma o fluidos hidrotermales para crear un sistema de alerta temprana eficiente (Terakawa et al., 2016).

La rotación de 90° de la orientación del estado de esfuerzos es indicativa del crecimiento de un dique paralelo a la dirección de esfuerzo σ_1 , el cual retoma a su estado natural cuando inicia una erupción ya que la presión ejercida por el crecimiento del dique es liberada, esta teoría es respaldada por modelos numéricos que indican que la intrusión y crecimientos de diques pueden producir cambios en el estado de esfuerzo de suficiente magnitud como para causar una reorientación de los ejes principales locales. Los regímenes de esfuerzo regionales y locales pueden coexistir, cuando se observa una rotación en el estado de esfuerzo y se pueden ver dos direcciones del esfuerzo principal σ_1 perpendiculares entre sí y que actúan en el mismo tiempo y espacio; esto puede ser explicado por la propagación del dique, a medida que el dique crece y asciende, se genera una zona de tensión en el extremo que puede generar desbloques de las fallas haciéndolas más susceptibles al deslizamiento en respuesta a la compresión regional. (Román et al., 2004).

En estudios como el realizado por Sánchez et al., (2004) durante el período 1989 – 1990 en el volcán Redoubt, Alaska, se modeló la re-orientación del eje σ_1 vertical durante los períodos de inactividad a σ_3 vertical durante los períodos eruptivos, adicionalmente se observó un cambio en varias direcciones en función de la latitud, longitud y profundidad, que fue interpretada como una serie de intrusiones de diques y silos en diferentes orientaciones. Según Musumeci et al. (2000), Durante el período de 1995 – 1998 no se observaron cambios significativos en función del tiempo en el Monte St. Helens, pero se

identificó un régimen de esfuerzo heterogéneo entre los 2,5 km y 5,5 km de profundidad causado por un medio altamente facturado debido a la presión ejercida por el gas y una compresión radial entre los 5,5 y 10,0 km de profundidad ocasionada por el esfuerzo ejercido por la cámara magmática. Arámbula-Mendoza, et al. (2010) proponen para el volcán Popocatepetl durante el período 1995 – 1998 un régimen extensivo en los primeros 3,0 km de profundidad y un cambio a régimen de rumbo en las zonas más profundas, durante períodos de inactividad a inversos durante el crecimiento del domo y los estados explosivos.

Según estos estudios, la influencia de la presión ejercida por la cámara magmática o la intrusión de diques y silos en una o varias direcciones es suficiente como para generar cambio en el régimen de esfuerzo local, en contraste a los resultados del presente trabajo, a partir de los cuales se infiere que posiblemente el ascenso y emplazamiento de un dique y un silo no siempre ejercen la presión suficiente como para sobrepasar el esfuerzo tectónico, pero pueden causar desbloqueo de fallas, haciéndolas más susceptibles al movimiento por el régimen compresivo regional.

6.2.4 Régimen de esfuerzo y el sistema geotérmico en el CVCCN

El régimen de esfuerzos en sistemas geotérmicos influencia a corto y largo plazo el reservorio, por lo tanto el conocimiento de las condiciones de esfuerzo en estas áreas es importante para la planeación y perforación de pozos, y para la sostenibilidad del recurso. Un régimen de esfuerzo específico determina estructuras de deformación en la roca, las cuales son reconocibles a varias escalas (macro, meso y micro-escala).

Es bien conocido que el potencial para que un fluido fluya a lo largo de una falla está relacionado al estado de esfuerzo que presenta la falla (Barton et al., 1995; Zhu & Wong, 1997, Zhang et al., 2007), aunque las propiedades mecánicas de las rocas también tienen una fuerte influencia en la permeabilidad de las fallas (Zhang et al., 2007). Según Moeck et al. (2008), en Barton et al. (1995), las fallas que pueden controlar la actividad hidráulica, las fallas que están a punto de deslizarse o se están deslizando (esfuerzo crítico), son consideradas como vías potenciales para los fluidos en acuíferos cristalinos y sedimentarios, mientras que Gudmudsson (2000) menciona que las fallas o fracturas extensionales actúan como vías para la conducción de fluido.

Varias líneas de evidencia sugieren que en cercanías al CVCCN se dan las condiciones favorables para circulación, tanto de fluidos relacionados a la recarga del sistema, como de fluidos geotérmicos. De acuerdo a INGEOMINAS (2009), cerca al CVCCN se presentan direcciones de flujo para el agua subterránea en sentidos NW-SE y N-S, y la combinación de fracturas y diaclasas, con direcciones predominantes SW-NE, en macizos rocosos de los sectores norte y sur de ambos volcanes representan condiciones geotécnicas que favorecen permeabilidades moderadas a altas (García, 2016; Bocanegra & Sánchez, 2017). Por lo tanto, se puede inferir, que el régimen compresivo al que está sujeto el CVCCN, expresado por discontinuidades locales y fallas inversas y de rumbo en estado de esfuerzo crítico estaría controlando las vías potenciales de flujo en direcciones preferenciales NW-SE y SW-NE.

7. Conclusiones

Se utilizaron los métodos FMSI y LSBI para realizar la inversión de grupos de MF de sismos registrados en el CVCCN y se aplicó el método de desajuste acumulado con el fin de identificar posibles cambios de esfuerzos locales en función del tiempo y espacio.

Durante el período comprendido entre el 13 de diciembre del 2014 y el 26 de agosto de 2015 se observa un régimen extensivo en dirección NWW-SEE que puede ser explicado por la intrusión o crecimiento de un dique o un silo ocurrido durante la culminación del tercer enjambre sísmico, mientras que en los otros períodos es posible que el esfuerzo tectónico compresivo haya facilitado la formación de un silo al oponerse al crecimiento del material magmático inyectado.

Se observó cambio en la orientación del esfuerzo de compresivo a extensivo en profundidad, donde σ_1 presenta una orientación sub-horizontal para eventos localizados entre 0,0 km y 6,0 km y una orientación sub-vertical para los eventos entre 6,0 km a 15,1 km, este cambio de régimen puede ser asociado a la presión ejercida por el sistema magmático del CVCCN.

La región más sureña y occidental del CVCCN presenta un régimen desconocido, con tendencia de σ_1 sub-vertical, mientras que en el resto del área predomina la orientación de σ_1 sub-horizontal con estilo de fallas inversas y ocasionalmente de rumbo o conjugadas.

El predominio del régimen compresivo con fallas inversas y ocasionalmente de rumbo puede indicar que los enjambres sísmicos en el CVCCN son gobernados principalmente, por la tectónica de la zona y que el ascenso de material magmático puede estar generando una reactivación de las fallas localizadas en el área cuyo movimiento está determinado por la tectónica regional para el período 2013 – 2015.

A. Anexo: MF calculados

	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
1	10/10/2013	1:22:23.77	-77.91634	0.8365	2.43	5.73	172	89	102	0.33
2	25/11/2013	4:9:55.69	-77.9145	0.95067	3.02	6.28	283	26	129	0.16
3	30/10/2014	5:43:24.47	-77.95316	0.801	2.99	4.56	62	66	-128	0
4	04/10/2014	13:27:40.36	-77.94434	0.81433	1.2	7.46	228	54	129	0.1
5	04/10/2014	13:59:7.3	-77.93283	0.82267	1.13	7.32	226	66	118	0.13
6	04/10/2014	14:11:4.74	-77.94366	0.81167	1.08	7.78	13	44	76	0.2
7	04/10/2014	17:23:3.77	-77.94783	0.8005	1.15	6.77	214	54	136	0.13
8	09/10/2014	7:56:53.62	-77.94783	0.83467	0.99	5.63	253	60	76	0.11
9	09/10/2014	9:5:0.55	-77.94067	0.80383	0.65	0.34	213	88	131	0.09
10	09/10/2014	9:8:3.98	-77.93716	0.81983	1.14	6.54	223	59	127	0.12
11	12/10/2014	15:39:48.57	-77.95483	0.80817	0.81	5.68	199	53	174	0.16
12	20/10/2014	19:17:23.92	-77.92384	0.79233	0.85	6.94	166	51	164	0
13	23/10/2014	4:46:19.09	-77.94783	0.80683	1.48	5.49	358	47	61	0
14	23/10/2014	4:57:30.49	-77.941	0.80233	0.93	5.23	225	66	126	0.16
15	23/10/2014	19:30:43.44	-77.95033	0.81	0.8	7.07	3	59	88	0.13
16	23/10/2014	19:53:29.21	-77.95316	0.80317	0.65	6.78	225	53	127	0.12
17	23/10/2014	20:0:9.47	-77.93884	0.8195	1.59	7.44	54	26	151	0.1

	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
18	23/10/2014	20:4:52.01	-77.9405	0.81133	1.64	7.65	214	55	111	0.28
19	23/10/2014	20:22:26.16	-77.939	0.80983	1.72	7.23	230	65	122	0.3
20	23/10/2014	20:27:42.68	-77.94366	0.83283	1.95	7.5	232	58	130	0.11
21	23/10/2014	20:32:3.35	-77.94783	0.81533	1.76	7.39	207	42	98	0.1
22	23/10/2014	20:37:27.76	-77.94783	0.8015	1.32	7.41	27	23	33	0
23	23/10/2014	20:40:20.98	-77.95383	0.807	0.85	7.12	224	46	114	0.1
24	23/10/2014	20:47:8.27	-77.94534	0.8045	1.65	7.22	236	63	122	0.31
25	23/10/2014	20:51:0.68	-77.94017	0.80117	1.46	5.82	244	69	116	0.24
26	23/10/2014	20:55:25.29	-77.9305	0.81483	1.72	5.1	178	87	119	0.24
27	23/10/2014	20:59:29.39	-77.94783	0.812	1.14	7.42	201	46	92	0.18
28	15/11/2014	6:31:19.57	-77.95016	0.80617	1.58	4.3	102	75	-105	0.12
29	15/11/2014	6:29:21.62	-77.94783	0.80483	1.31	3.99	79	89	-99	0.12
30	15/11/2014	6:3:32.41	-77.94783	0.805	1.4	4.06	85	8	81	0.12
31	16/11/2014	2:27:12.62	-77.9545	0.80233	2.01	4.32	168	61	130	0.3
32	16/11/2014	2:13:47.67	-77.95417	0.80533	1.86	4.21	216	70	124	0
33	16/11/2014	1:6:19.58	-77.93367	0.79283	1.93	4.45	221	84	126	0.12
34	15/11/2014	18:57:9.54	-77.94783	0.7965	1.88	3.9	256	70	163	0.06
35	16/11/2014	6:53:25.51	-77.95383	0.803	1.73	3.66	269	37	-35	0
36	17/11/2014	0:17:5.81	-77.9515	0.8035	0	4.42	66	86	-121	0
37	16/11/2014	22:6:22.05	-77.94783	0.80617	1.59	7.27	205	70	122	0.23
38	16/11/2014	23:11:34.81	-77.94783	0.80283	2.48	6.98	218	53	118	0.12
39	18/11/2014	8:51:3.73	-77.954	0.796	1.47	4.78	212	88	118	0.15
40	18/11/2014	8:21:29.91	-77.94783	0.79967	1.57	4.22	250	56	147	0
41	18/11/2014	5:41:21.51	-77.954	0.794	1.14	4.31	208	85	117	0.14
42	18/11/2014	5:25:37.26	-77.93483	0.79583	1.47	4.43	294	46	-129	0.12

	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
43	18/11/2014	23:15:12.34	-77.9495	0.8025	1.83	4.86	60	89	-116	0
44	19/11/2014	5:7:30.15	-77.95084	0.8035	1.16	4.25	327	22	-20	0
45	19/11/2014	4:31:39.81	-77.954	0.803	1.38	4.3	19	75	-121	0
46	19/11/2014	4:24:20.37	-77.952	0.80283	1.96	4.85	46	86	-122	0
47	18/11/2014	23:11:29.26	-77.95383	0.804	1.9	4.89	256	82	117	0.11
48	20/11/2014	12:15:33.66	-77.95417	0.80383	1.73	4.66	194	72	133	0.16
49	20/11/2014	8:13:9.33	-77.93233	0.79917	1.95	4.24	243	19	-164	0
50	20/11/2014	6:7:35.87	-77.95184	0.8025	1.43	4.58	79	83	-117	0
51	19/11/2014	9:32:43.78	-77.95817	0.80067	1.44	4.77	212	84	147	0
52	21/11/2014	4:58:20.85	-77.93317	0.79767	1.59	4.28	37	86	-117	0.11
53	21/11/2014	7:2:29.64	-77.9515	0.79983	1.98	4.55	237	71	130	0.07
54	21/11/2014	5:37:0.63	-77.95216	0.8075	1.05	4	12	77	-116	0
55	21/11/2014	1:6:9.06	-77.93317	0.794	2.7	4.35	7	87	-132	0.29
56	21/11/2014	17:8:39.36	-77.94783	0.794	0.84	4.7	55	88	-135	0.07
57	22/11/2014	0:19:32.66	-77.96066	0.794	2.11	4.84	26	73	-112	0.11
58	21/11/2014	21:13:33.48	-77.95667	0.79583	1.58	5.04	162	53	97	0.14
59	21/11/2014	21:9:8.49	-77.95634	0.80333	1.39	4.68	218	86	115	0
60	22/11/2014	6:4:52.01	-77.94183	0.7985	1.87	4.84	186	71	139	0.14
61	22/11/2014	6:7:52.22	-77.94267	0.79883	2.06	4.45	191	80	137	0.15
62	22/11/2014	20:28:46.8	-77.95683	0.794	2.34	4.81	256	85	144	0
63	22/11/2014	14:26:44.82	-77.9615	0.79233	1.78	4.73	216	86	145	0.1
64	22/11/2014	13:16:30.41	-77.95617	0.794	1.62	4.77	250	88	140	0
65	23/11/2014	4:4:22.08	-77.96083	0.79617	1.86	5.36	43	79	-146	0.15
66	21/11/2014	6:30:15.75	-77.95866	0.806	1.21	4.72	12	23	15	0
67	23/11/2014	7:57:29.78	-77.9585	0.79067	1.08	4.81	251	80	132	0
68	23/11/2014	12:37:22.17	-77.9555	0.78533	1.34	4.74	198	47	146	0.1
69	23/11/2014	16:28:25.34	-77.93317	0.8	1.82	4.11	135	83	-85	0

	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
70	22/11/2014	13:5:34.37	-77.95267	0.78917	0.98	5.56	158	83	125	0
71	22/11/2014	13:11:37.19	-77.9545	0.7885	1.64	5.93	306	61	126	0.12
72	21/11/2014	19:47:45.47	-77.94617	0.803	1.33	4.3	62	61	154	0
73	24/11/2014	21:7:41.95	-77.958	0.79683	1.22	4.49	259	84	129	0
74	25/11/2014	1:43:10.08	-77.9535	0.79633	0.78	4.72	278	72	168	0
75	25/11/2014	9:1:0.34	-77.94783	0.79183	2.49	3.9	312	21	10	0
76	25/11/2014	5:38:27.88	-77.96433	0.7965	1.89	4.72	57	80	-104	0.1
77	25/11/2014	7:0:10.39	-77.94783	0.794	1.56	4.19	197	83	135	0.14
78	24/11/2014	16:35:0.02	-77.95116	0.7975	1.58	3.69	95	60	-116	0.12
79	24/11/2014	23:28:0.32	-77.93517	0.79083	1.66	4.48	175	88	-81	0
80	26/11/2014	4:5:58.57	-77.94133	0.789	1.32	4.86	196	72	141	0.1
81	26/11/2014	8:21:25.27	-77.95617	0.7905	1.44	4.75	195	71	160	0.13
82	26/11/2014	9:15:25.54	-77.95184	0.798	1.35	4.28	232	88	132	0.12
83	26/11/2014	9:16:55.86	-77.95533	0.78267	1.05	6.84	321	22	24	0.13
84	26/11/2014	11:30:55.38	-77.93916	0.809	2.25	3.51	20	84	-104	0.17
85	26/11/2014	9:35:32.85	-77.95133	0.80317	1.16	3.74	51	71	-110	0.16
86	26/11/2014	9:40:58.87	-77.93733	0.794	1.55	6.14	305	29	-37	0.12
87	26/11/2014	9:56:22.7	-77.9495	0.80633	1.46	3.5	44	77	-106	0.16
88	26/11/2014	9:26:34.01	-77.9195	0.79017	1.1	5.61	212	70	132	0.2
89	27/11/2014	1:22:7.88	-77.95567	0.79017	1.56	5.47	93	77	-117	0.1
90	27/11/2014	14:56:12.66	-77.94017	0.80133	2.88	3.96	180	75	149	0.15
91	27/11/2014	9:35:26.52	-77.95167	0.79	1.26	4.31	192	80	175	0.23
92	27/11/2014	4:3:5.42	-77.9535	0.79733	1.01	3.95	283	37	-92	0.14
93	27/11/2014	3:34:43.34	-77.95634	0.78867	1.59	3.54	195	85	147	0.12
94	28/11/2014	16:10:3.72	-77.94783	0.79167	1.4	4.96	188	78	163	0.13

	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
95	29/11/2014	2:7:39.37	-77.93517	0.82733	1.85	2.89	206	80	-176	0
96	29/11/2014	7:14:25.35	-77.94534	0.79633	1.54	4.85	251	83	124	0
97	30/11/2014	6:2:10	-77.967	0.78417	1.95	5	88	83	-130	0.13
98	28/11/2014	4:12:27.39	-77.95683	0.78	1.01	4.57	103	74	-112	0.24
99	28/11/2014	4:24:19.87	-77.96183	0.78833	0.96	4.73	354	21	-25	0.11
100	27/11/2014	22:0:58.48	-77.96017	0.79083	1.5	5.12	21	86	-156	0.13
101	26/11/2014	9:13:10.32	-77.95417	0.80317	1.75	3.6	122	21	110	0.11
102	30/11/2014	23:12:28.15	-77.9525	0.7965	2.44	3.5	279	25	-39	0.42
103	24/11/2014	0:49:30.8	-77.94334	0.7995	2.13	2.87	210	82	-172	0.11
104	24/11/2014	1:6:23.11	-77.94984	0.80083	1.14	3.9	215	82	134	0
105	28/11/2014	15:20:23.76	-77.95866	0.792	0	4.75	15	77	-149	0
106	01/12/2014	4:9:54.45	-77.95316	0.79933	1.66	4.04	101	69	-114	0
107	01/12/2014	10:57:9.2	-77.956	0.797	1.58	5.52	231	76	130	0.11
108	01/12/2014	12:3:8.33	-77.95316	0.79783	1.26	3.51	94	64	-133	0
109	01/12/2014	12:16:50.13	-77.95617	0.7865	1.09	4.28	171	85	154	0.12
110	01/12/2014	22:58:8.67	-77.95533	0.7915	3.71	4.64	268	89	113	0.1
111	01/12/2014	17:38:48.53	-77.94534	0.78233	1.67	5	217	17	164	0.11
112	02/12/2014	1:46:24.19	-77.961	0.7915	1.97	4.21	12	84	-148	0
113	02/12/2014	1:49:24.6	-77.958	0.794	1.62	4.5	13	80	-159	0
114	02/12/2014	13:7:16.55	-77.95634	0.80133	1.01	5.07	200	89	131	0.15
115	02/12/2014	14:55:59.05	-77.93983	0.784	1.44	4.72	84	83	-108	0
116	02/12/2014	15:32:1.13	-77.941	0.78317	1.42	5.29	192	23	-179	0
117	02/12/2014	23:44:3.84	-77.95383	0.79083	0.82	5.26	218	79	136	0
118	03/12/2014	5:29:55.64	-77.95316	0.78983	0.55	4.67	195	79	161	0.13
119	03/12/2014	7:42:35.9	-77.95216	0.8065	0.41	3.91	17	80	-152	0
120	03/12/2014	9:42:16.55	-77.93383	0.79583	0.99	4.29	222	25	-176	0
121	03/12/2014	13:1:26.99	-77.94067	0.7835	2.03	5.32	200	20	-174	0.06

	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
122	03/12/2014	4:32:30.61	-77.9575	0.79033	0.85	5.4	265	85	127	0.11
123	04/12/2014	0:45:58.74	-77.94417	0.79433	1.23	5.04	348	39	39	0.12
124	04/12/2014	13:41:14.34	-77.95167	0.7885	1.71	6.22	238	87	123	0
125	03/12/2014	5:33:28.33	-77.9535	0.794	0.47	5.5	263	86	92	0
126	03/12/2014	5:39:25.25	-77.95284	0.79717	1.13	4.78	188	88	152	0
127	03/12/2014	5:43:42.21	-77.94783	0.80667	1.18	3.5	57	83	178	0.11
128	03/12/2014	5:55:18.67	-77.9495	0.80033	0.87	3.34	243	76	-173	0
129	03/12/2014	7:33:26.54	-77.94117	0.80767	1.23	3.28	313	29	-166	0.27
130	04/12/2014	3:31:40.61	-77.95734	0.79067	1.99	6.77	24	85	-133	0.12
131	04/12/2014	5:47:10.77	-77.96133	0.797	1.35	4.72	120	22	84	0.22
132	04/12/2014	11:55:31.38	-77.94984	0.80733	1.32	4.15	347	85	96	0.13
133	04/12/2014	12:49:18.92	-77.95667	0.80067	1	4.7	228	72	114	0
134	04/12/2014	12:51:16.48	-77.96033	0.804	0.79	4.84	201	17	-138	0.22
135	04/12/2014	13:26:42.7	-77.958	0.78917	1.14	5.9	111	50	117	0.12
136	03/12/2014	4:46:18.77	-77.95617	0.781	1.02	5.15	151	63	-162	0.11
137	05/12/2014	5:10:28.59	-77.957	0.79317	1.16	5.3	309	9	-33	0.13
138	05/12/2014	15:14:12.29	-77.94017	0.78633	1.18	5.19	257	89	102	0.09
139	07/12/2014	05:22:54.07	-77.95417	0.80067	1.79	4.85	191	57	141	0
140	07/12/2014	09:07:12.39	-77.90234	0.78	2.79	8.67	203	83	146	0.09
141	06/12/2014	08:0:3.11	-77.96733	0.7895	1.36	5.84	244	15	-87	0.09
142	07/12/2014	22:0:50.24	-77.9665	0.76833	1.02	6.14	87	82	-154	0.12
143	08/12/2014	4:41:49.79	-77.96883	0.76983	1.99	4.69	264	80	134	0.26
144	08/12/2014	12:13:17.23	-77.95683	0.80483	1.64	4.51	61	86	-97	0.11
145	08/12/2014	22:13:35.05	-77.95433	0.79483	1.84	4.23	212	85	124	0.1
146	09/12/2014	4:11:20.26	-77.90383	0.78033	1.38	8.73	205	52	168	0.23

	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
147	09/12/2014	10:16:21.26	-77.955	0.80767	1.66	4.17	24	73	-112	0
148	09/12/2014	20:28:31.02	-77.9555	0.79933	2.5	4.4	290	75	106	0.14
149	09/12/2014	20:28:22.52	-77.957	0.79967	0.08	4.57	101	89	-97	0.07
150	09/12/2014	15:37:10.17	-77.97433	0.84417	1.69	5.71	52	70	-111	0.18
151	09/12/2014	5:5:54.79	-77.94234	0.801	0.6	4.27	202	83	142	0
152	09/12/2014	5:19:58.83	-77.95533	0.80533	1.24	4.14	242	34	146	0.13
153	09/12/2014	6:40:38.72	-77.95467	0.80883	1.05	4.81	264	82	110	0.13
154	10/12/2014	4:8:6.83	-77.9405	0.7765	1.51	5.84	270	40	-142	0.21
155	10/12/2014	8:36:5.37	-77.896	0.7265	1.76	7.91	222	70	-171	0.22
156	10/12/2014	8:38:34.11	-77.96066	0.80017	2.11	5.03	266	83	130	0.12
157	10/12/2014	16:12:12.15	-77.95717	0.80483	1.8	4.78	34	24	32	0.12
158	09/12/2014	5:13:15.42	-77.95267	0.80467	1.73	3.92	225	20	168	0.28
159	09/12/2014	7:13:41.68	-77.93767	0.8045	0.65	3.56	229	37	128	0.1
160	09/12/2014	8:0:58.67	-77.94883	0.8015	1.16	4.58	262	85	95	0.08
161	09/12/2014	9:4:23	-77.93684	0.802	0.84	3.92	129	78	-89	0
162	09/12/2014	9:53:35.58	-77.9545	0.80117	0.93	5.12	273	81	111	0.09
163	10/12/2014	16:27:0.5	-77.95	0.80333	0.95	4.74	338	16	7	0
164	09/12/2014	10:30:58.09	-77.9455	0.82117	0.94	5.14	252	80	120	0
165	09/12/2014	11:9:25.59	-77.936	0.79867	1.15	3.43	17	82	98	0.18
166	09/12/2014	12:15:27.92	-77.94217	0.80167	1.63	3.62	249	68	123	0
167	09/12/2014	13:41:25.8	-77.936	0.79183	1.54	4.44	227	89	119	0.13
168	09/12/2014	14:20:12.69	-77.94383	0.80033	0.5	4.33	43	81	-102	0.07
169	09/12/2014	15:8:0.96	-77.9575	0.79733	1.35	4.25	117	88	-92	0
170	09/12/2014	18:45:48.62	-77.94783	0.80617	1.66	4.43	322	78	73	0.12
171	09/12/2014	21:36:56.58	-77.93367	0.794	1.64	4.1	276	40	3	0.16
172	09/12/2014	22:15:9.91	-77.9445	0.79783	1.12	2.7	39	82	-132	0
173	9/12/2014	23:39:53.49	-77.95316	0.79467	0.99	3.52	226	89	143	0

	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
174	10/12/2014	1:6:31.73	-77.953	0.79767	1.62	4.83	261	66	125	0.14
175	10/12/2014	1:10:44.92	-77.95084	0.805	1.21	3.9	257	51	150	0
176	10/12/2014	2:34:19.84	-77.95367	0.80483	1.45	3.75	91	84	-79	0.03
177	10/12/2014	3:55:14.94	-77.90517	0.78167	1.65	8.38	47	72	-111	0.06
178	10/12/2014	5:14:1.5	-77.95467	0.80567	0.89	3.95	270	81	110	0.13
179	10/12/2014	7:13:37.11	-77.9545	0.79817	0.99	4.08	268	24	149	0.15
180	10/12/2014	7:13:50.52	-77.95216	0.80033	1.04	4.22	237	46	144	0.15
181	10/12/2014	7:51:11.74	-77.95267	0.797	1.31	4.43	257	69	130	0.13
182	10/12/2014	8:16:28.09	-77.94117	0.80367	1.31	3.56	16	58	75	0
183	10/12/2014	10:24:59.24	-77.95016	0.80417	1.27	2.99	63	68	-120	0.16
184	10/12/2014	14:21:31.32	-77.9365	0.80767	2.29	3.12	233	51	155	0
185	13/12/2014	13:56:0.82	-77.95167	0.80933	1.69	3.14	276	21	6	0
186	13/12/2014	21:0:24.37	-77.9645	0.79667	1.88	4.35	277	19	-5	0
187	12/12/2014	3:40:44.33	-77.95517	0.794	1.87	5.07	275	87	101	0
188	12/12/2014	4:3:52.68	-77.95417	0.801	2.54	3.02	188	78	154	0.28
189	12/12/2014	4:17:6.96	-77.94767	0.80067	1.73	2.69	127	83	-88	0.1
190	12/12/2014	7:24:40.71	-77.94917	0.79917	2.24	3.18	212	84	143	0
191	12/12/2014	9:37:57.92	-77.94267	0.80283	1.54	3.1	121	38	96	0.29
192	12/12/2014	13:5:43.92	-77.9455	0.79733	1.99	3.92	265	81	112	0.13
193	14/12/2014	0:41:22.35	-77.94167	0.79867	1.57	5.7	258	71	107	0.16
194	14/12/2014	0:49:19.16	-77.94383	0.80017	1.62	4.3	231	78	116	0.07
195	14/12/2014	1:7:49.05	-77.945	0.80367	1.54	3.9	203	20	163	0.1
196	14/12/2014	1:9:4.14	-77.9435	0.8025	1.69	4.41	229	75	121	0.05
197	17/12/2014	2:44:24.48	-77.94967	0.8045	0.75	4.68	266	82	109	0.11
198	17/12/2014	7:34:45.38	-77.95834	0.79833	1.28	5.5	248	84	127	0

	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
199	20/12/2014	2:55:10.39	-77.93733	0.77317	1.42	5.52	260	79	-166	0.18
200	21/12/2014	3:33:32.15	-77.97633	0.78017	1.49	4.59	292	31	-98	0.12
201	21/12/2014	4:49:44.1	-77.96567	0.78383	2.3	6.1	189	63	158	0.11
202	15/12/2014	0:0:27.06	-77.96484	0.78267	2.2	8.44	256	87	130	0.1
203	21/12/2014	2:48:2.38	-77.9705	0.7925	3.87	5.1	309	7	-80	0.12
204	28/01/2015	2:57:30.02	-77.8525	0.881	1.92	9.89	16	87	107	0.14
205	3/05/2015	12:34:59.74	-77.94033	0.73683	1.13	9.23	225	84	146	0
206	7/06/2015	15:34:24.73	-77.86183	0.7355	1.98	7.48	19	48	-117	0.14
207	10/06/2015	3:32:44.3	-77.959	0.78933	2.42	4.26	4	77	-166	0
208	10/06/2015	6:50:45.85	-77.95683	0.7865	1.81	4.3	44	85	-132	0.11
209	10/06/2015	9:1:34.1	-77.9565	0.80767	1.71	4.33	50	77	-139	0
210	12/06/2015	0:18:12.84	-77.9545	0.80133	1.17	4.19	59	78	-132	0.1
211	12/06/2015	11:16:22.17	-77.9515	0.80533	1.22	3.78	59	75	-115	0
212	13/06/2015	23:37:56.61	-77.967	0.78433	2.26	5.67	226	42	178	0
213	10/06/2015	16:21:4.9	-77.94783	0.80317	1.94	3.23	206	78	116	0
214	14/06/2015	12:48:59.85	-77.96317	0.78817	0	7.86	7	87	-153	0.05
215	14/06/2015	18:50:39.15	-77.95167	0.8075	1.37	4.17	49	63	-172	0.1
216	14/06/2015	19:5:35.07	-77.95084	0.80917	1.5	4.39	192	65	143	0.12
217	14/06/2015	19:12:2.83	-77.95084	0.8095	0.87	3.92	287	39	-98	0.13
218	15/06/2015	13:34:15.99	-77.94666	0.81533	1.21	3.21	96	62	-104	0
219	14/06/2015	20:4:31.08	-77.963	0.79317	1.17	5.62	154	87	118	0.15
220	15/06/2015	23:40:12.14	-77.93584	0.78417	2.05	5.49	238	78	137	0.12
221	15/06/2015	23:46:17.29	-77.936	0.787	0	5.84	193	53	178	0.13
222	16/06/2015	22:5:12.98	-77.95717	0.79217	0.84	3.11	188	60	137	0.1
223	20/06/2015	20:53:26.11	-77.93467	0.77617	3.21	6.67	68	84	-116	0.06
224	28/06/2015	0:40:30.59	-77.97234	0.78767	2.97	6	186	87	155	0.13
225	28/06/2015	0:40:30.85	-77.96516	0.7905	2.52	5.81	189	88	165	0

	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
226	29/06/2015	15:53:57.6	-77.97217	0.78317	1.14	5.53	198	77	155	0.1
227	30/06/2015	18:15:25.73	-77.9895	0.76917	1.29	7.47	243	90	178	0
228	01/07/2015	13:13:54.15	-77.94483	0.797	1.12	3.48	324	19	40	0
229	05/07/2015	19:21:1.78	-77.96017	0.75717	0.89	7.66	195	74	162	0
230	07/07/2015	16:4:59.63	-77.95417	0.80467	1.55	3.55	182	90	103	0.31
231	08/07/2015	10:3:22.04	-77.957	0.80467	1.85	4.48	348	90	-124	0
232	12/07/2015	7:33:25.47	-77.93716	0.81067	1.36	2.61	272	21	-44	0
233	15/07/2015	17:14:9.28	-77.95567	0.81867	0.86	4.22	234	90	107	0.11
234	16/07/2015	3:35:24.87	-77.955	0.77117	0.67	4.85	135	85	-56	0.13
235	17/07/2015	4:38:58.37	-77.9485	0.809	1.75	3.09	239	28	-159	0.17
236	17/07/2015	4:52:1.12	-77.94817	0.80717	1.04	3.3	74	78	-96	0
237	17/07/2015	18:38:5.81	-77.95084	0.80567	1.79	3.79	241	7	-115	0
238	17/07/2015	22:36:58.4	-77.95284	0.7985	1.82	4.11	321	25	-47	0
239	18/07/2015	1:2:31.83	-77.95766	0.79	1.28	3.9	63	68	-151	0
240	18/07/2015	4:2:13.56	-77.95016	0.80667	1.69	3.48	55	77	-121	0
241	18/07/2015	3:19:32.08	-77.9505	0.80867	1.04	3.29	78	78	-95	0
242	18/07/2015	1:6:15.72	-77.95033	0.8095	1.44	3.36	321	16	-24	0
243	20/07/2015	3:53:45.16	-77.95116	0.779	2.23	5.49	206	9	-163	0.11
244	22/07/2015	8:39:26.61	-77.95316	0.80933	1.1	4.01	53	76	-106	0
245	23/07/2015	3:13:41.57	-77.9525	0.81	1.37	3.84	295	11	-31	0
246	26/07/2015	11:44:58.61	-77.94917	0.80633	0.8	3.26	265	11	-88	0
247	26/07/2015	16:53:4.53	-77.85983	0.73567	2.42	2.87	207	90	-150	0.13
248	27/07/2015	11:0:31.25	-77.95267	0.80817	1.4	3.58	74	82	-112	0.11
249	27/07/2015	10:59:53.51	-77.95267	0.8095	1.06	3.5	50	83	-118	0
250	30/07/2015	6:34:21.44	-77.9525	0.80867	0.71	3.5	120	69	-97	0.19

	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
251	04/08/2015	8:42:8.16	-77.95983	0.8025	1.82	5.5	282	84	103	0
252	08/08/2015	5:5:35.11	-77.96817	0.78333	1.26	5.87	248	73	162	0.08
253	10/08/2015	19:38:31.25	-77.98	0.7795	1.32	7.87	208	82	161	0.1
254	11/08/2015	23:39:24.13	-77.95517	0.815	2.31	4	22	84	-122	0
255	11/08/2015	20:6:1.13	-77.953	0.8115	2.46	3.64	12	86	-118	0
256	11/08/2015	20:6:12	-77.95367	0.80933	1.35	3.97	138	83	97	0.14
257	12/08/2015	7:40:44.54	-77.95683	0.81133	1.02	4.01	183	87	136	0.15
258	11/08/2015	23:58:35.08	-77.95216	0.81467	1.77	3.56	33	77	-120	0.13
259	12/08/2015	1:19:37.34	-77.953	0.814	1.36	3.6	17	85	-130	0
260	12/08/2015	2:51:43.86	-77.95683	0.805	0.89	3.75	9	88	-126	0
261	12/08/2015	18:6:42.52	-77.95216	0.80567	0.59	3.56	46	63	-111	0.15
262	14/08/2015	10:19:25.09	-77.95734	0.808	0.22	4.55	150	72	-171	0
263	19/11/2014	7:57:35.0	-77.95734	0.80017	1.89	4.8	24	12	17	0.08
264	24/08/2015	19:55:55.91	-77.86833	0.71717	2.28	7.32	35	87	-169	0.2
265	26/08/2015	2:42:34.12	-77.9385	0.812	1.05	3.03	194	76	-177	0.07
266	26/08/2015	7:54:13.74	-77.9375	0.80583	1.36	4.54	271	67	-150	0.03
267	26/08/2015	12:55:39.36	-77.935	0.82117	0.7	3.02	245	80	172	0
268	29/08/2015	21:17:31.07	-77.93567	0.82117	1.22	2.74	264	59	-156	0.16
269	30/08/2015	17:21:27.39	-77.9365	0.81	1.15	5.5	253	81	-141	0.31
270	04/09/2015	3:46:39.76	-77.94317	0.79117	1.22	4.22	222	50	161	0
271	05/09/2015	3:7:21.16	-77.931	0.83067	0.06	2.9	312	66	-152	0.33
272	05/09/2015	6:27:41.9	-77.93633	0.7895	0.65	5.27	359	23	14	0
273	13/09/2015	21:30:11.46	-77.93517	0.80417	1.26	3.66	157	79	142	0.01
274	13/09/2015	21:24:30.42	-77.93716	0.82117	1.85	3.25	232	75	-146	0.18
275	16/09/2015	0:26:39.7	-77.878	0.75417	1.39	8.02	234	56	134	0.03
276	25/09/2015	5:1:41.59	-77.93166	0.79033	1.9	4.85	246	70	-167	0

	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
277	27/09/2015	16:43:32.72	-77.96783	0.80233	2.01	5.81	161	88	107	0.15
278	30/09/2015	5:43:3.01	-77.97517	0.80533	1.41	5.87	294	14	44	0.14
279	01/10/2015	0:31:58.03	-77.93	0.80417	0.96	4.3	225	56	-178	0.13
280	02/10/2015	22:29:14.4	-77.96616	0.78633	0.96	5.07	296	18	-52	0.1
281	05/10/2015	16:37:49.04	-77.9575	0.797	1.26	5.27	214	87	152	0
282	07/10/2015	15:52:32.71	-77.9375	0.77967	2.25	5.83	223	42	169	0.1
283	07/10/2015	20:50:57.37	-77.93616	0.78233	1.18	5.91	267	11	-163	0.15
284	08/10/2015	3:8:14.07	-77.94234	0.77367	1.19	5.96	282	9	-94	0.11
285	13/10/2015	0:4:2.84	-77.92416	0.76483	1.81	7.8	74	87	-125	0.19
286	16/10/2015	12:4:28.08	-77.93633	0.817	2.23	5.99	251	54	85	0.14
287	24/10/2015	13:27:49.65	-77.9275	0.82367	0.94	2.87	201	75	-142	0.05
288	28/10/2015	11:37:21.27	-77.95583	0.80567	0.72	6.07	16	46	-131	0.1
289	28/10/2015	11:37:41.51	-77.95683	0.80583	0.75	6.27	337	69	-114	0
290	28/10/2015	23:37:46.5	-77.93916	0.804	1.28	4.68	346	61	-164	0
291	31/10/2015	18:11:13.02	-77.95133	0.80767	0.45	3.66	173	89	123	0.29
292	01/11/2015	1:37:52.09	-77.95367	0.794	1.52	4.52	16	62	-130	0
293	02/11/2015	22:35:4.66	-77.94417	0.806	1.57	1.96	252	22	28	0.25
294	03/11/2015	5:43:3.09	-77.927	0.824	2.63	3.15	211	83	-171	0
295	03/11/2015	12:41:8.61	-77.96983	0.78433	1.33	6.63	312	90	103	0
296	05/11/2015	14:44:54.31	-77.95917	0.77817	0.36	4.43	225	13	-82	0.25
297	06/11/2015	1:51:50	-77.94167	0.81383	1.6	7.24	190	70	126	0
298	06/11/2015	16:46:8.77	-77.95766	0.79867	1.19	6.11	262	81	121	0
299	06/11/2015	17:22:31.43	-77.93217	0.82733	0.09	3.16	326	76	-121	0.14
300	08/11/2015	8:22:54.02	-77.98167	0.77017	1.46	4.92	240	69	-177	0
301	08/11/2015	13:27:27.53	-77.978	0.7595	1.01	5.22	261	69	-160	0.1

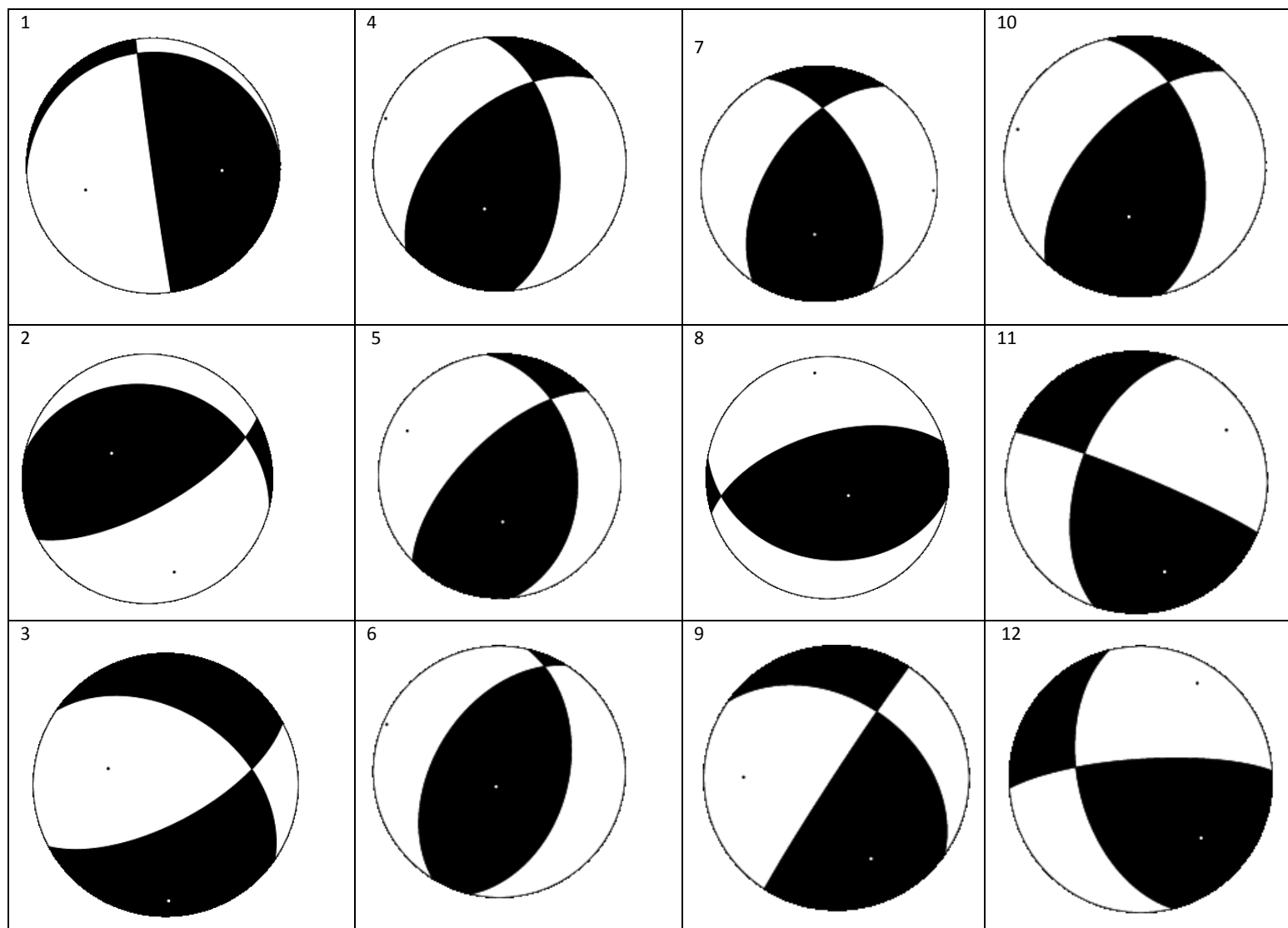
	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
302	08/11/2015	16:17:9.29	-77.98917	0.768	1.13	3.76	97	74	-137	0.15
303	08/11/2015	21:33:46.43	-77.95167	0.80517	1.1	3.55	119	74	-111	0.12
304	09/11/2015	7:5:57.41	-77.83466	0.86167	1.64	10.8	217	29	-64	0
305	10/11/2015	12:15:4.39	-77.96117	0.80583	1.3	4.63	192	85	138	0
306	11/11/2015	12:22:57.12	-77.9825	0.7715	1.63	2.64	146	41	-49	0.15
307	11/11/2015	21:56:53.81	-77.90816	0.7935	1.83	6.82	235	6	-117	0.11
308	12/11/2015	9:22:6.14	-77.95184	0.802	0.87	3.89	355	87	-125	0.2
309	13/11/2015	4:49:9.31	-77.96233	0.80117	1.53	5.78	274	80	127	0
310	13/11/2015	8:9:12.24	-77.95834	0.80483	1.18	4.98	269	81	114	0.11
311	14/11/2015	15:23:14.15	-77.9325	0.82817	0.97	3.18	98	81	168	0.23
312	14/11/2015	21:48:20.21	-77.93	0.82867	0.44	3.06	288	89	-132	0.16
313	15/11/2015	3:47:52.94	-77.96183	0.8005	1.25	6	281	85	114	0
314	15/11/2015	18:1:48.72	-77.9825	0.76967	1.98	4.59	101	62	-131	0
315	16/11/2015	8:5:53.47	-77.9625	0.79867	0.43	6.6	262	77	127	0
316	17/11/2015	7:12:29.91	-77.98067	0.77533	1.63	7.96	98	85	-123	0.13
317	17/11/2015	7:35:37.16	-77.979	0.77417	0.82	6.21	134	77	-77	0
318	17/11/2015	6:8:46.7	-77.92834	0.8245	0.03	2.31	358	68	-157	0.11
319	17/11/2015	11:48:25.46	-77.95966	0.802	1.41	5.99	270	81	108	0
320	17/11/2015	11:16:42.39	-77.95483	0.8005	0.44	6.24	222	49	135	0
321	18/11/2015	1:40:28.28	-77.94917	0.79467	1.51	6.86	198	70	135	0.12
322	18/11/2015	16:12:23.82	-77.95383	0.80083	0.81	4.32	54	72	178	0
323	19/11/2015	0:41:35.31	-77.91067	0.79317	1.72	7.11	259	59	-129	0.12
324	17/11/2015	8:36:12.01	-77.89467	0.78133	0.49	8.26	246	76	134	0.14
325	17/11/2015	13:3:53.56	-77.96033	0.80067	0.42	5.69	311	65	121	0
326	19/11/2015	5:5:28.57	-77.8935	0.76383	0.63	10.11	286	61	154	0
327	20/11/2015	4:33:50.76	-77.92817	0.82267	0.29	3.3	201	82	-161	0.06
328	20/11/2015	10:44:13.42	-77.93317	0.82117	0.78	4.96	120	87	146	0.17

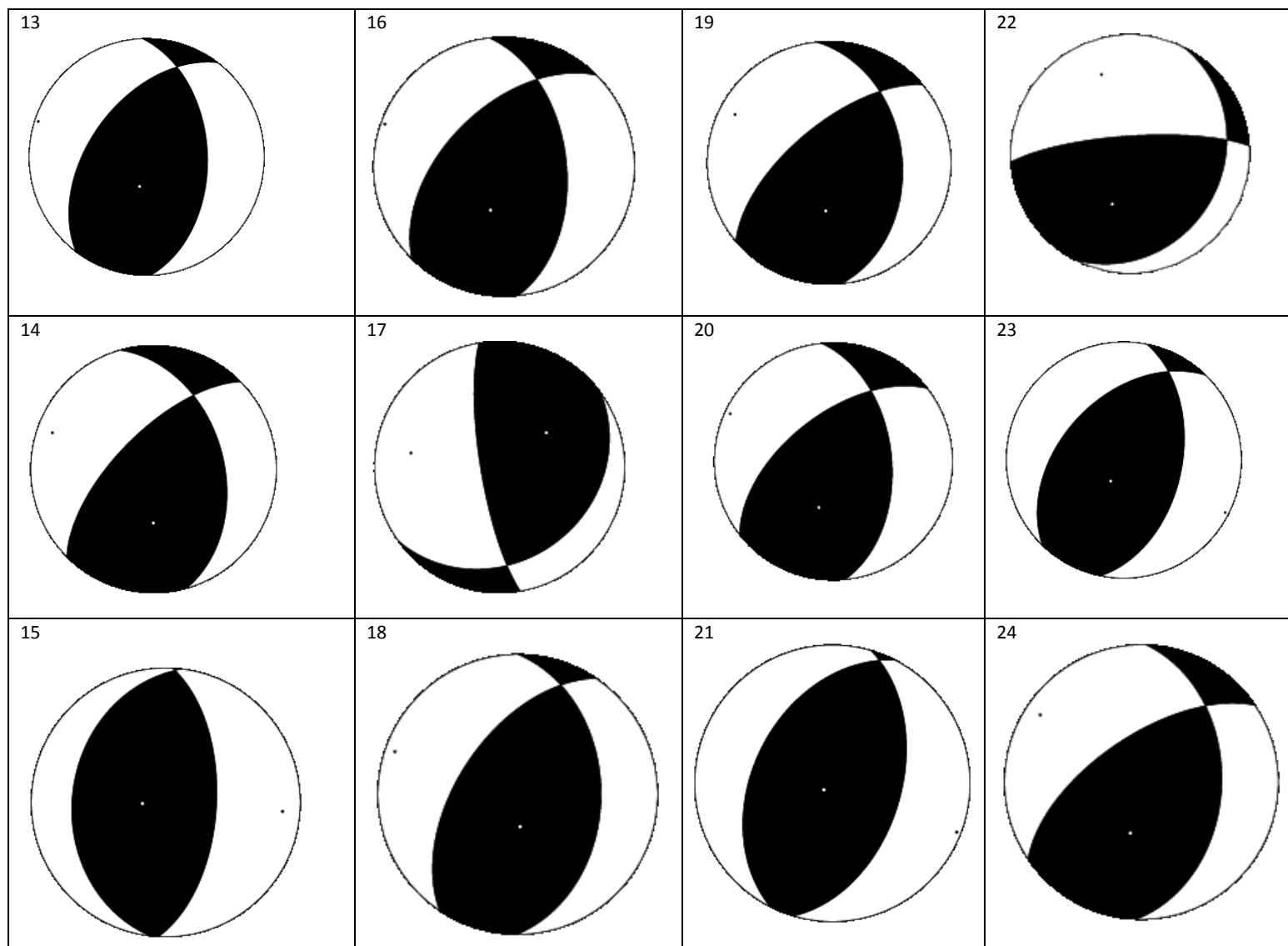
	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
329	20/11/2015	13:10:57.53	-77.95567	0.77733	1.39	5.15	354	14	-24	0
330	19/11/2015	9:31:25.4	-77.93117	0.82883	0.46	2.98	101	47	170	0
331	19/11/2015	9:32:5.08	-77.931	0.82817	0.02	2.48	112	80	151	0
332	19/11/2015	20:10:30.49	-77.961	0.798	1.59	6.09	287	81	115	0
333	19/11/2015	23:53:44.48	-77.96283	0.80117	0.51	7.19	245	64	140	0
334	20/11/2015	22:34:59.62	-77.96	0.79967	1.65	5.8	261	79	127	0
335	21/11/2015	5:37:26.87	-77.95917	0.79967	1.18	6.11	271	80	104	0
336	21/11/2015	9:7:22.55	-77.96	0.805	1.29	5.5	280	83	98	0.1
337	21/11/2015	10:56:18.89	-77.95983	0.80183	1.17	6.17	272	80	120	0
338	21/11/2015	17:50:8.34	-77.933	0.82583	0.79	2.84	337	4	-101	0.16
339	22/11/2015	12:16:45.84	-77.93517	0.78867	1.56	5.07	246	33	-173	0
340	22/11/2015	16:40:47.68	-77.95834	0.80633	2.05	5.11	271	74	120	0
341	21/11/2015	16:47:59.27	-77.9595	0.8035	1.16	5.68	273	81	120	0
342	21/11/2015	17:34:8.07	-77.966	0.77633	1.41	15.1	342	59	150	0.13
343	23/11/2015	1:14:20.94	-77.9625	0.80117	1.03	5.9	60	14	44	0
344	23/11/2015	0:53:10.56	-77.9615	0.80033	0.84	5.91	247	64	143	0
345	23/11/2015	4:27:2.75	-77.961	0.7975	0.88	6.46	264	88	121	0.04
346	24/11/2015	10:53:38.39	-77.98967	0.77433	1.09	5.24	103	79	-103	0
347	24/11/2015	10:54:8.19	-77.98083	0.76433	1.54	5.61	339	28	-56	0
348	24/11/2015	20:32:55.54	-77.93983	0.8115	0.71	2.79	59	88	-141	0
349	25/11/2015	7:18:11.52	-77.94133	0.81383	0.95	2.7	254	65	-177	0
350	25/11/2015	7:37:32.74	-77.94234	0.8125	0.57	2.53	132	36	-51	0
351	25/11/2015	7:55:50.82	-77.941	0.81283	0.5	2.64	97	49	-110	0.27
352	25/11/2015	18:25:33.29	-77.95383	0.80683	1.04	3.9	50	71	-101	0
353	26/11/2015	9:42:57.32	-77.96183	0.7995	1.75	6.58	283	85	110	0

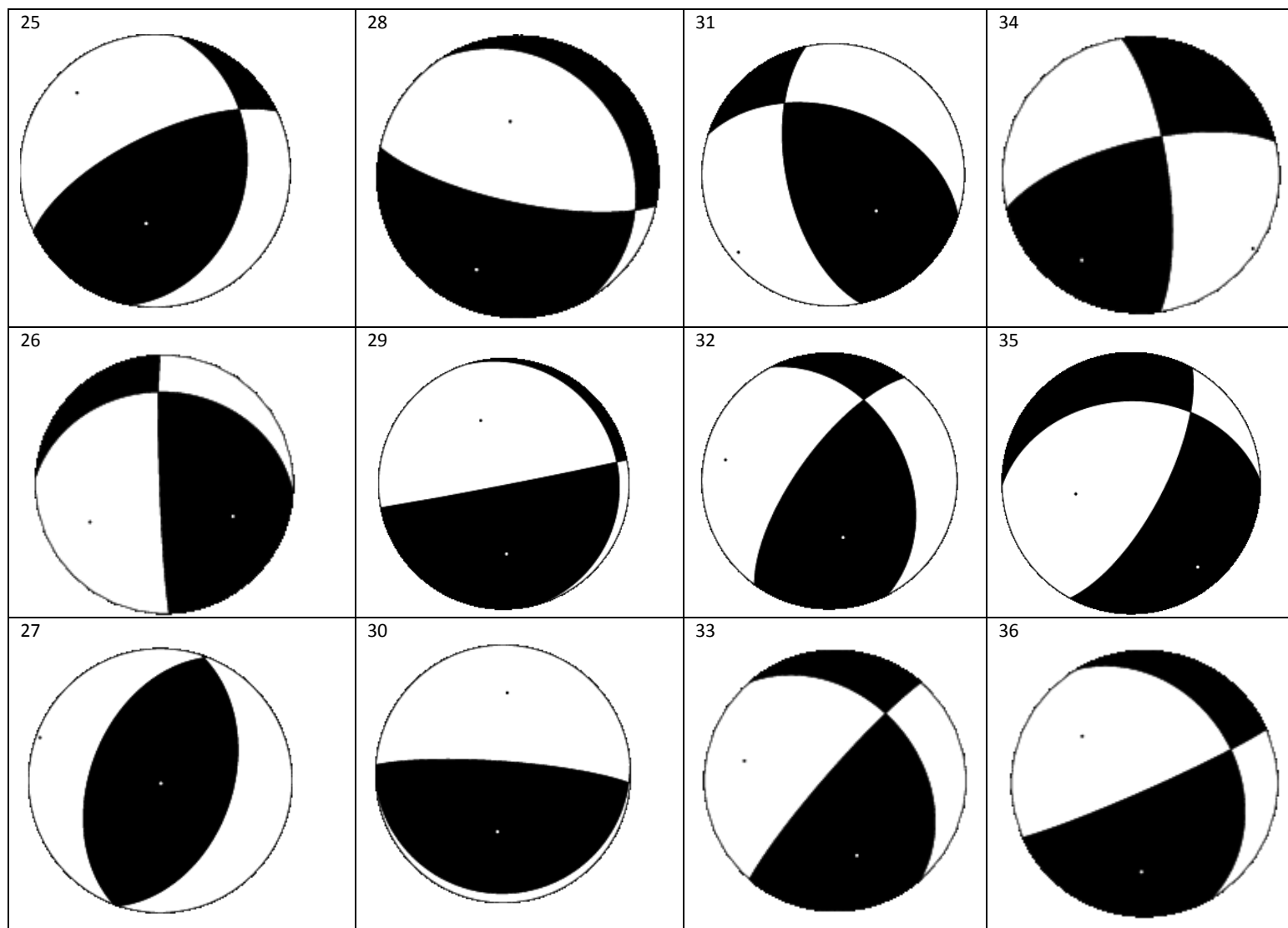
	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
354	25/11/2015	0:56:39.36	-77.95983	0.80233	0.57	6.25	37	18	45	0
355	26/11/2015	22:43:35.18	-77.98417	0.77533	1.13	3.52	122	59	-107	0
356	27/11/2015	4:6:38.69	-77.9325	0.82983	0.57	2.49	297	82	-161	0
357	27/11/2015	5:18:2.72	-77.93166	0.82683	0.65	3.29	184	16	-50	0.13
358	27/11/2015	14:32:25.56	-77.98683	0.7705	0.97	4.39	117	54	-120	0
359	28/11/2015	2:48:58.92	-77.931	0.7975	2.25	4.44	82	89	-125	0.16
360	28/11/2015	12:5:10.7	-77.96133	0.80133	1.78	6.23	258	73	123	0
361	29/11/2015	8:30:51.34	-77.9345	0.82483	0.1	2.86	285	13	51	0
362	27/11/2015	8:26:4.9	-77.95966	0.80683	0.59	5.5	283	78	113	0
363	29/11/2015	9:18:29.16	-77.958	0.7965	1.68	4.7	43	73	-105	0
364	29/11/2015	23:20:6.32	-77.94483	0.812	0.59	2.54	160	75	112	0.14
365	30/11/2015	13:27:49.27	-77.96133	0.8035	1.07	5.71	158	7	134	0
366	01/12/2015	6:38:56.73	-77.95683	0.80367	0.88	5.2	234	73	119	0
367	01/12/2015	8:16:42.96	-77.9445	0.797	0.75	3.46	35	89	-114	0
368	02/12/2015	12:0:37.46	-77.975	0.77867	1.39	5.68	135	81	-92	0
369	04/12/2015	16:31:1.97	-77.958	0.80317	1.42	5.11	267	79	116	0
370	05/12/2015	3:4:21.14	-77.92617	0.82217	0.43	3.06	246	29	156	0.16
371	05/12/2015	5:26:40.26	-77.9535	0.8005	0.43	6.37	129	29	118	0.13
372	05/12/2015	5:26:46.02	-77.964	0.79883	0.29	6.41	302	72	95	0.15
373	05/12/2015	7:24:41.22	-77.95483	0.80317	0.27	3.68	75	45	72	0
374	05/12/2015	10:38:55.58	-77.95184	0.794	0	5.83	258	86	111	0
375	07/12/2015	23:36:23.36	-77.96917	0.78883	1.67	6.84	14	15	1	0
376	08/12/2015	22:40:12.79	-77.93716	0.8225	0.95	3.1	90	82	108	0.17
377	09/12/2015	20:8:56.77	-77.93083	0.7975	1.46	5.3	222	36	172	0.11
378	09/12/2015	20:14:32.68	-77.93233	0.81383	0.7	3.17	79	79	-105	0.07
379	11/12/2015	12:31:1.83	-77.962	0.78183	0.84	6.27	221	57	155	0
380	12/12/2015	6:40:5	-77.9585	0.80383	0.29	5.1	279	70	125	0.16

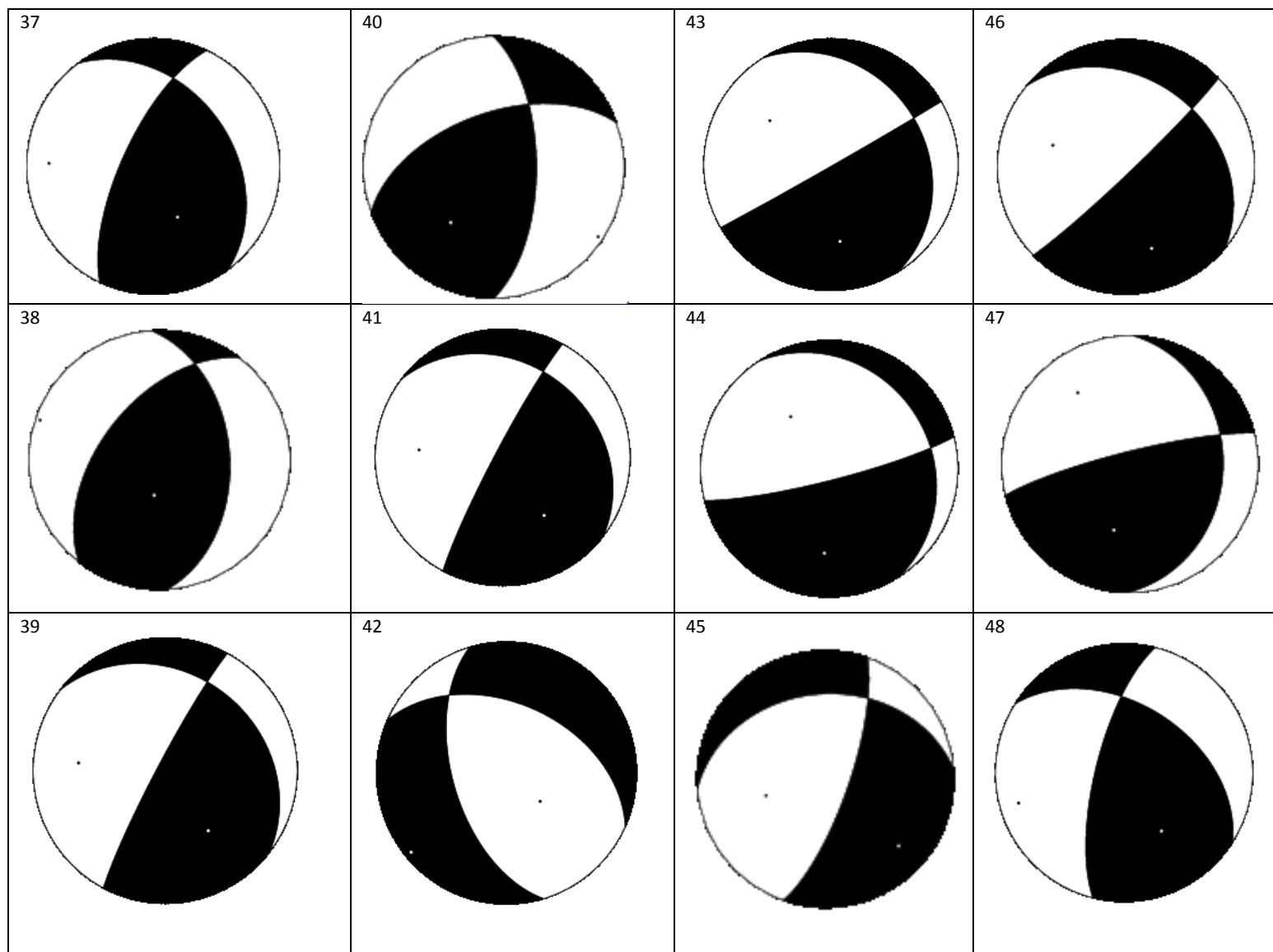
	Fecha	Hora	Lon	Lat	M _L	Profundidad (km)	Strike	Dip	Rake	Misfit
381	12/12/2015	11:56:15.59	-77.96167	0.79667	1.24	6.11	279	87	120	0
382	13/12/2015	1:10:5.99	-77.96233	0.80233	1.42	5.67	273	79	121	0
383	13/12/2015	5:49:59.86	-77.96917	0.77417	2.17	6.74	122	78	-84	0
384	13/12/2015	23:39:0.7	-77.97467	0.782	0.75	5.38	263	34	-130	0.12
385	14/12/2015	14:4:52.76	-77.93467	0.82433	1.5	3.19	247	89	-106	0
386	14/12/2015	14:27:51.84	-77.96733	0.792	1.1	6.49	122	87	-109	0
387	14/12/2015	21:54:37.78	-77.971	0.78567	1.12	7.34	102	89	-98	0
388	15/12/2015	7:25:2.02	-77.96983	0.78683	1.61	5.93	228	27	-177	0
389	15/12/2015	11:31:37.98	-77.9705	0.77883	0.73	6.08	290	89	99	0
390	15/12/2015	14:25:48.92	-77.96883	0.78317	1.29	6.34	359	27	-25	0.12
391	15/12/2015	19:36:11.14	-77.9805	0.78183	1.22	5.77	246	25	178	0
392	16/12/2015	9:45:33.78	-77.92733	0.8235	0.02	3.18	203	89	-175	0.05
393	16/12/2015	12:42:54.06	-77.9615	0.8015	0.89	5.27	173	86	133	0
394	17/12/2015	0:9:23.21	-77.97183	0.7895	0.84	6.2	266	81	115	0
395	18/12/2015	5:32:0.3	-77.96066	0.80083	0.73	5.87	23	22	25	0
396	19/12/2015	11:56:56.76	-77.95766	0.801	0.89	6.3	250	72	116	0
397	20/12/2015	0:53:3.15	-77.97383	0.786	1.6	6.7	116	87	-103	0
398	20/12/2015	1:11:27.06	-77.96933	0.787	1.71	6.19	281	89	107	0
399	21/12/2015	3:26:16.17	-77.95917	0.804	0.19	5.84	254	71	128	0
400	21/12/2015	17:11:47.11	-77.9085	0.78167	1.17	8.09	247	75	-125	0.1
401	22/12/2015	11:24:23.33	-77.93066	0.8225	0.38	3.25	115	78	129	0.17
402	22/12/2015	16:27:25.42	-77.9745	0.7835	1.44	6.6	127	77	-98	0.13
403	22/12/2015	16:26:24.51	-77.968	0.78917	0.93	6.86	205	37	152	0.09
404	22/12/2015	16:28:33.23	-77.97667	0.78217	0.47	5.96	254	74	145	0.12
405	31/12/2015	23:25:36.5	-77.979	0.7885	0.66	6.1	123	81	-104	0

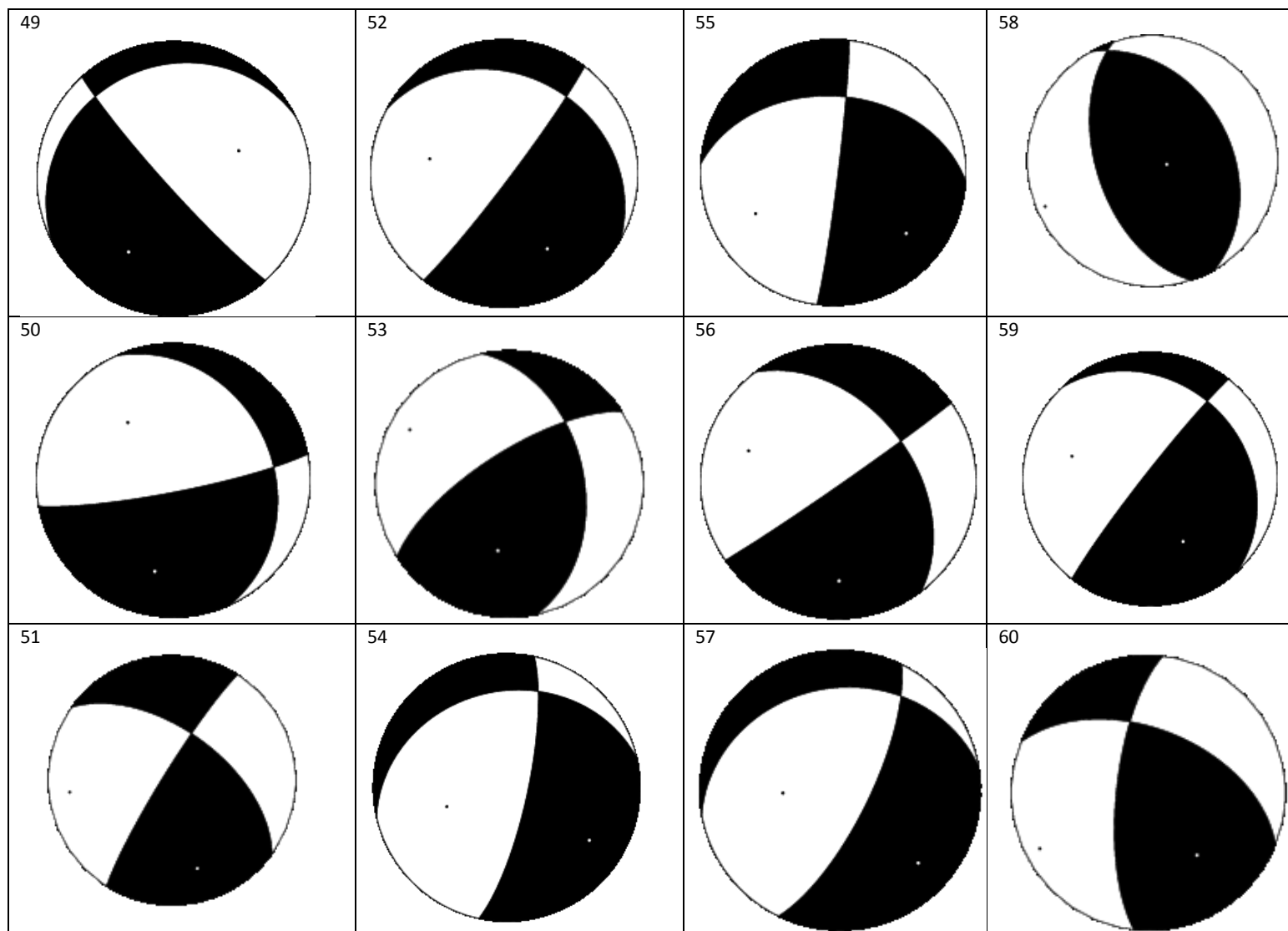
B. Anexo: Proyecciones de hemisferio inferior para los MF del Anexo A.

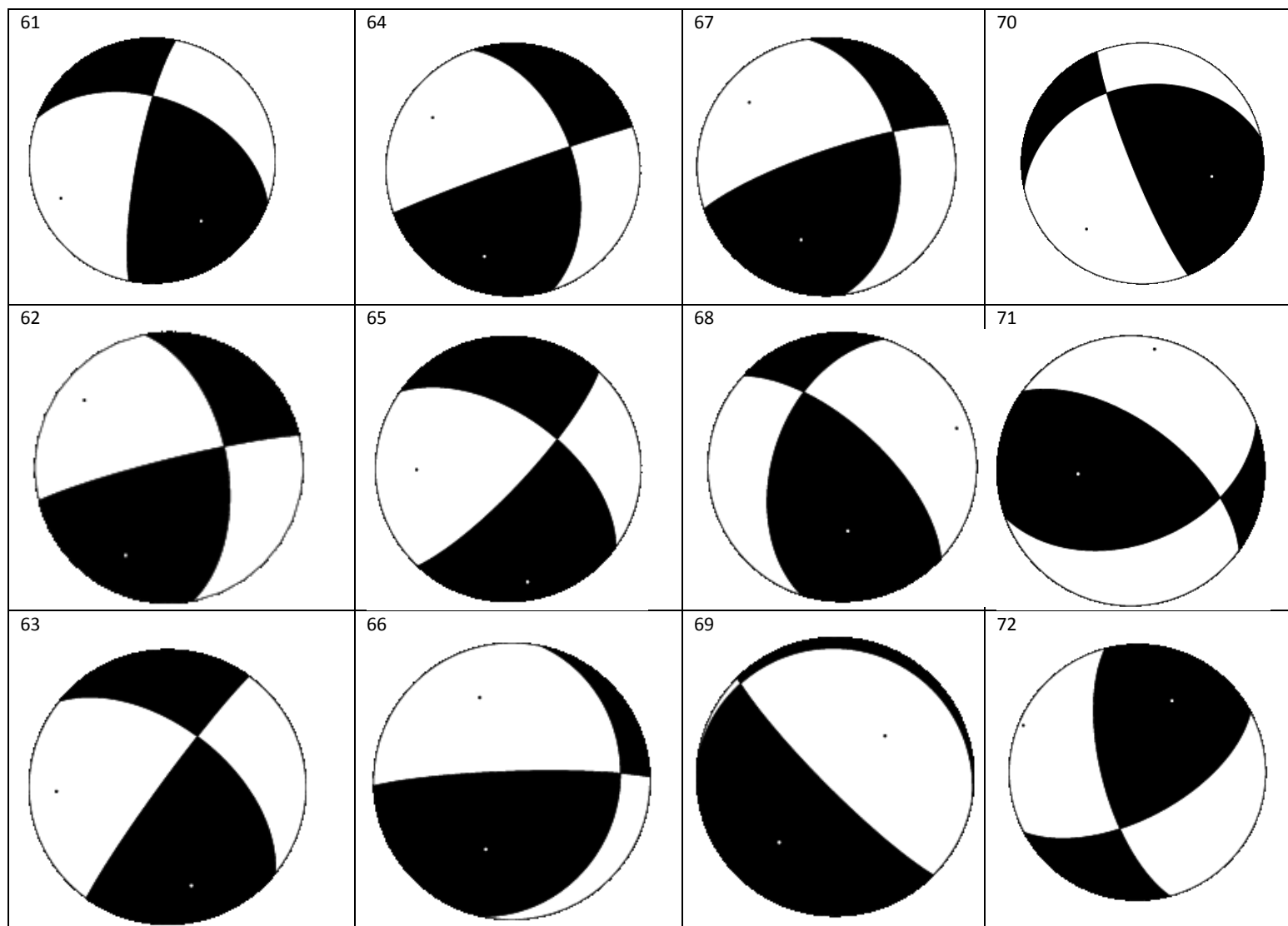


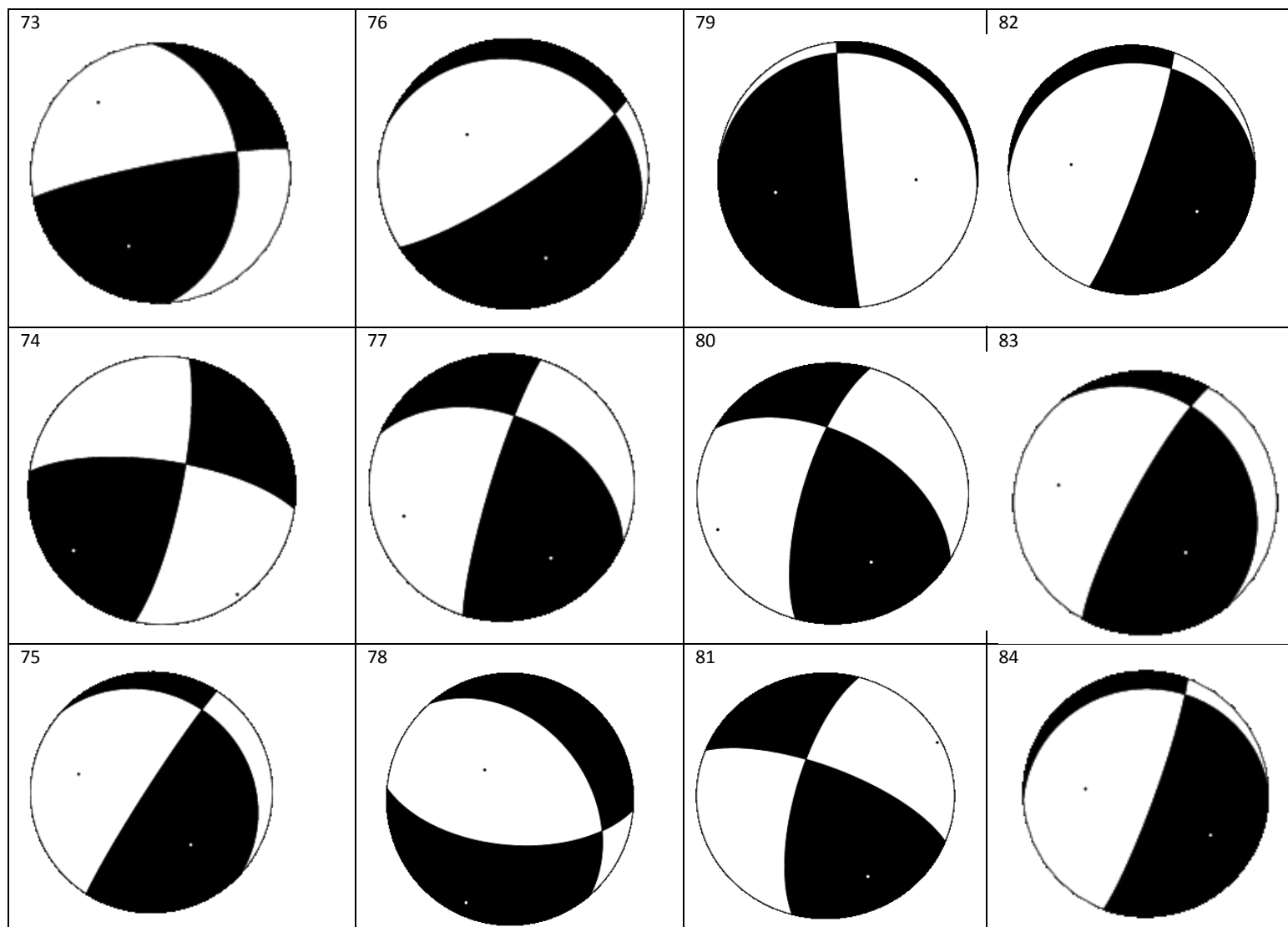


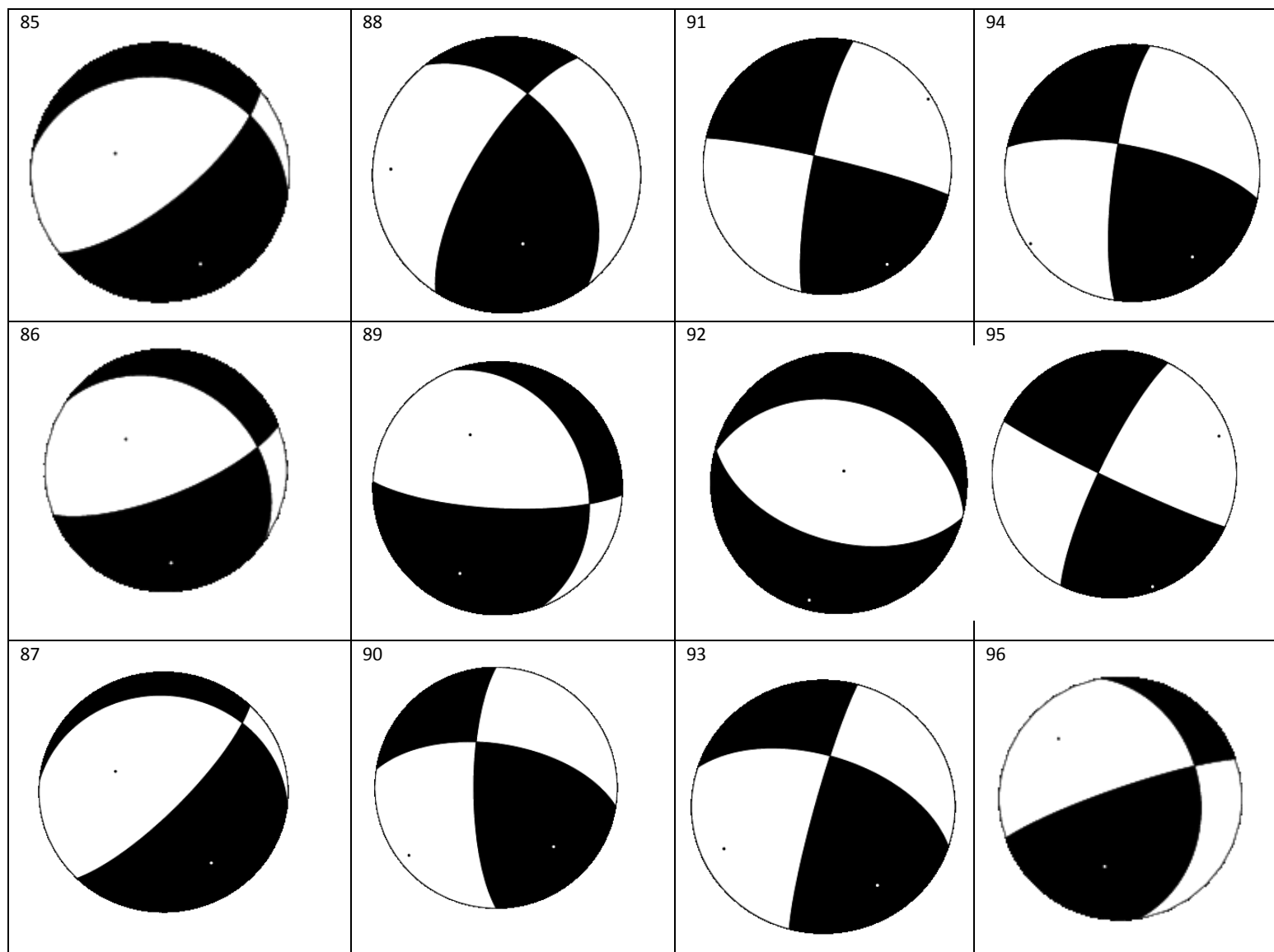


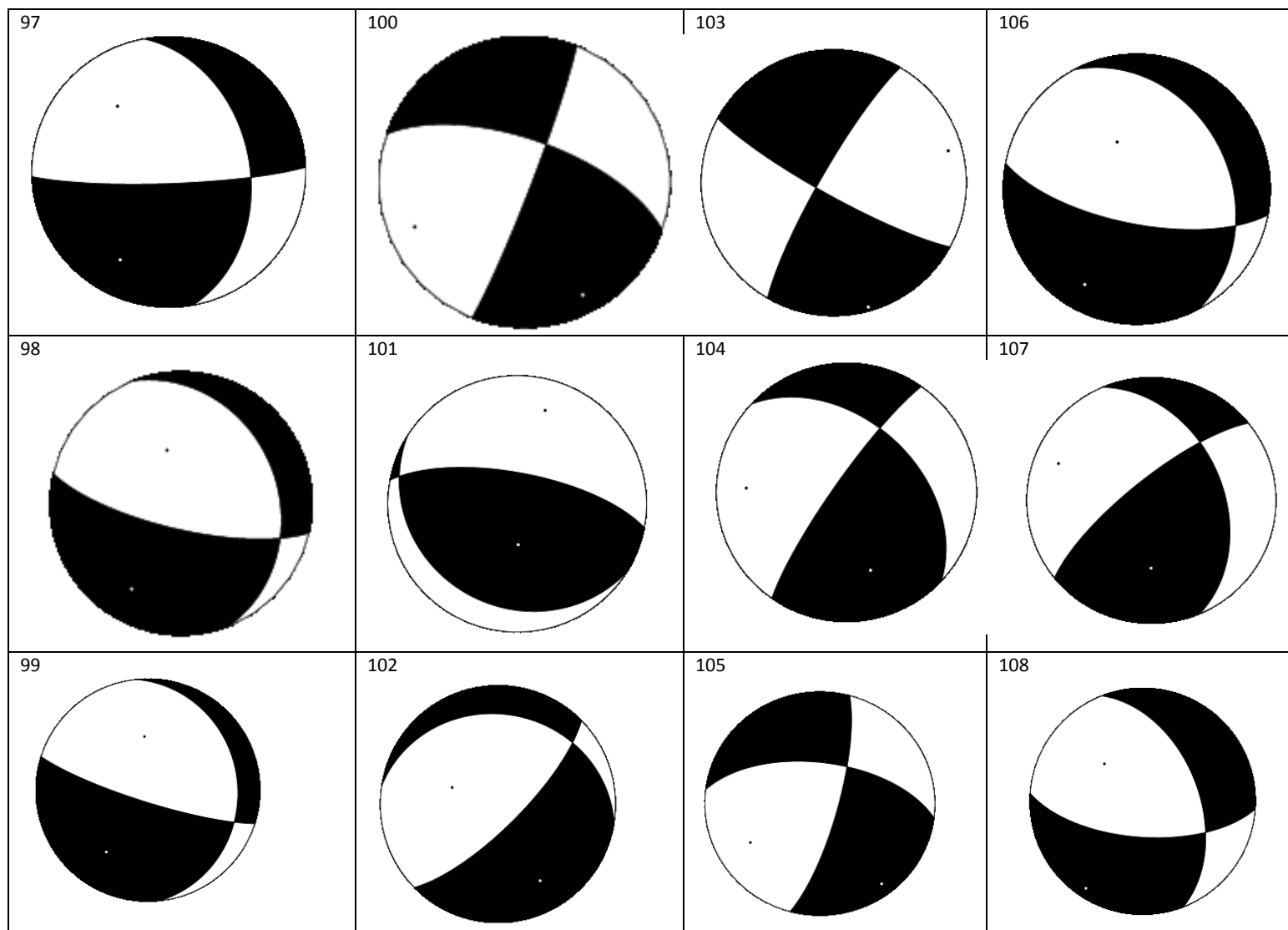


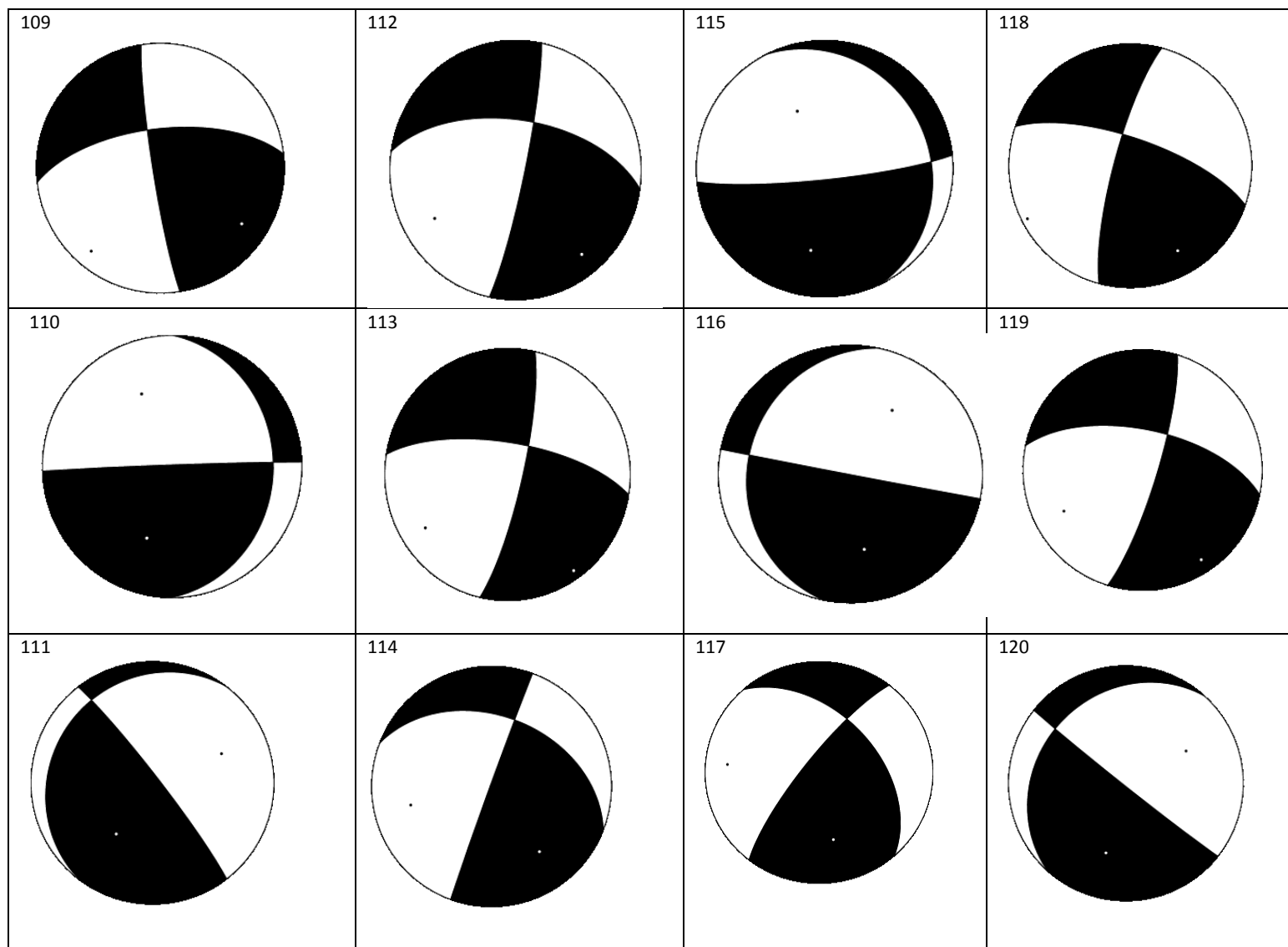


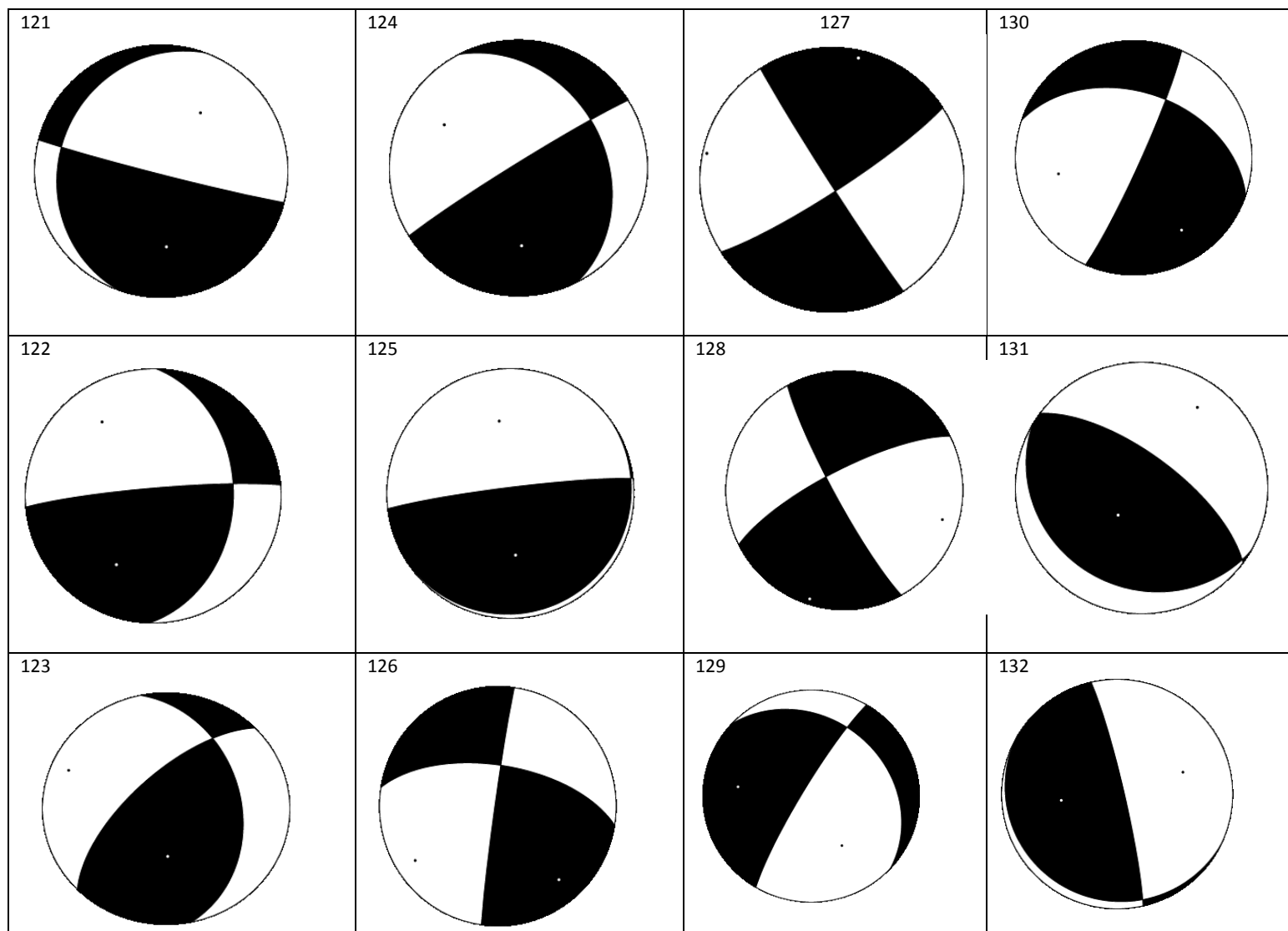


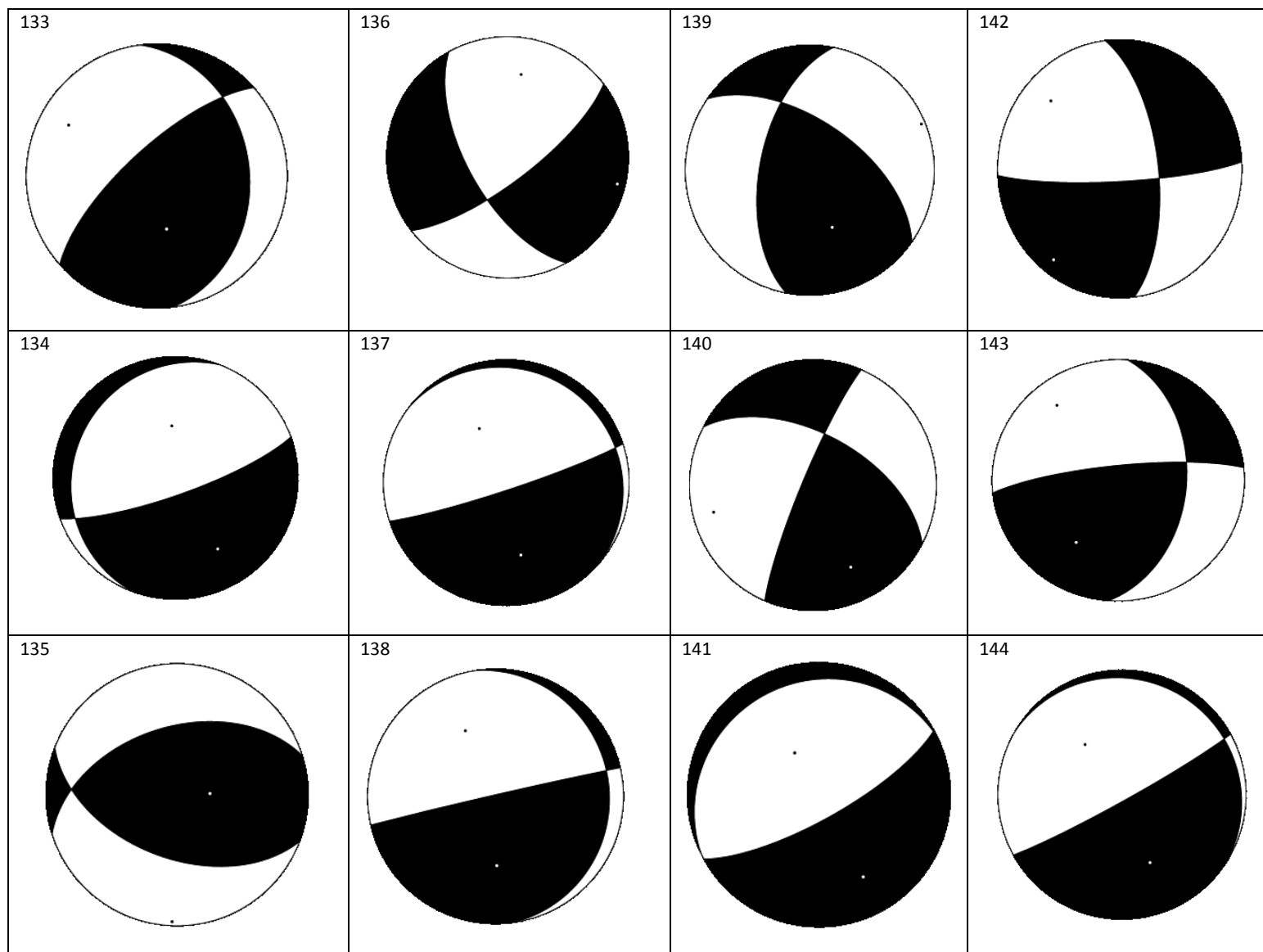


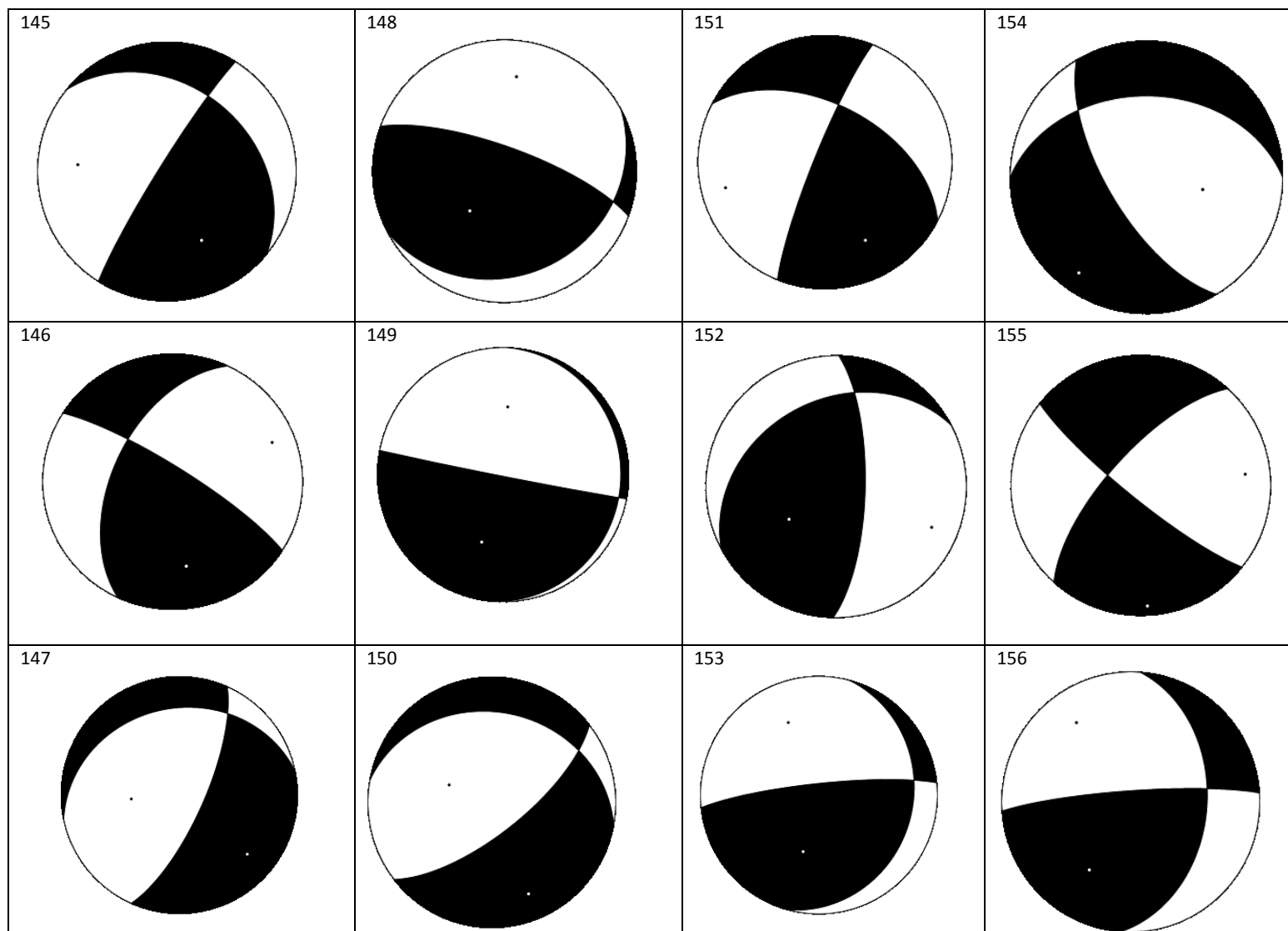


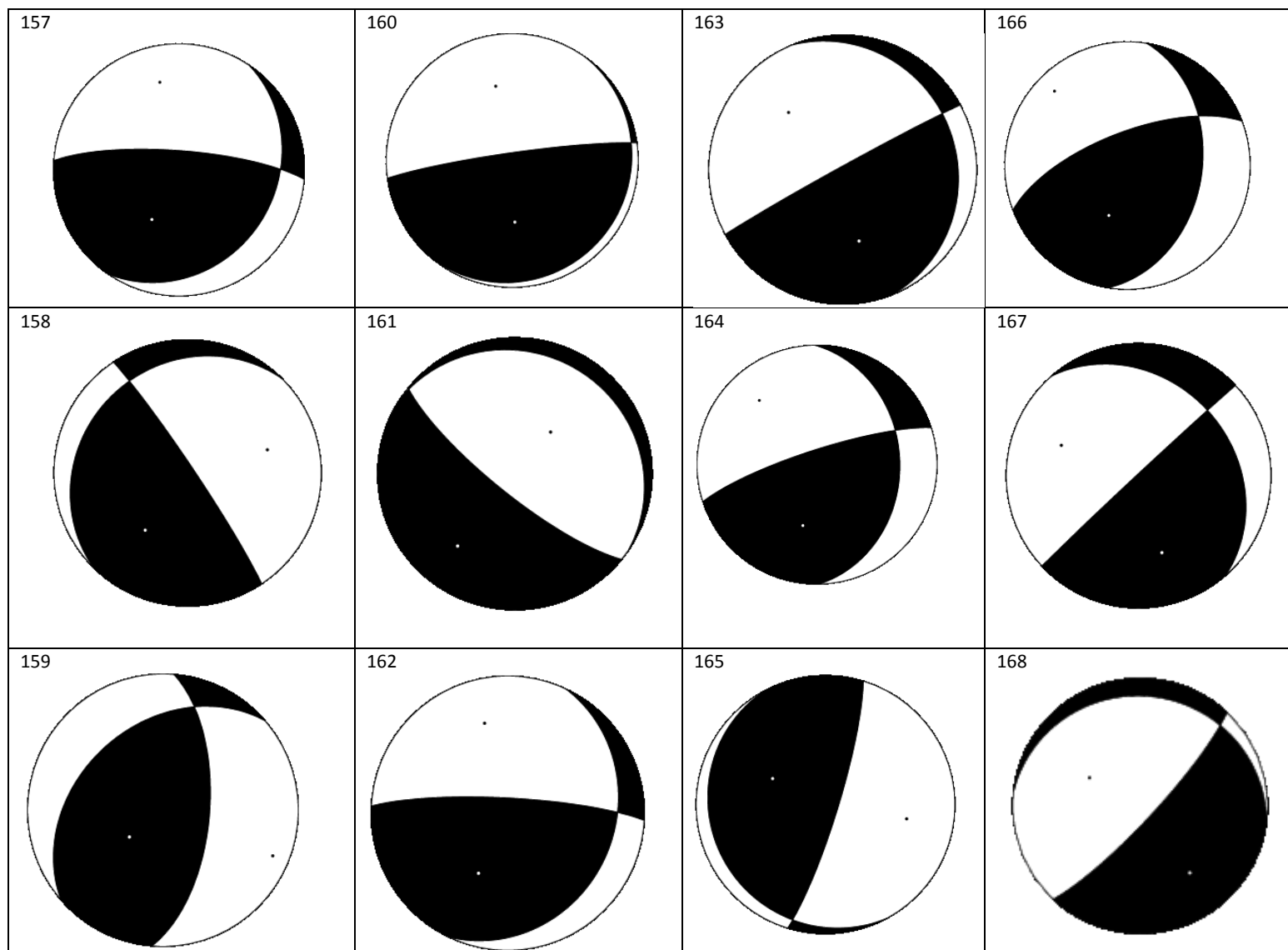


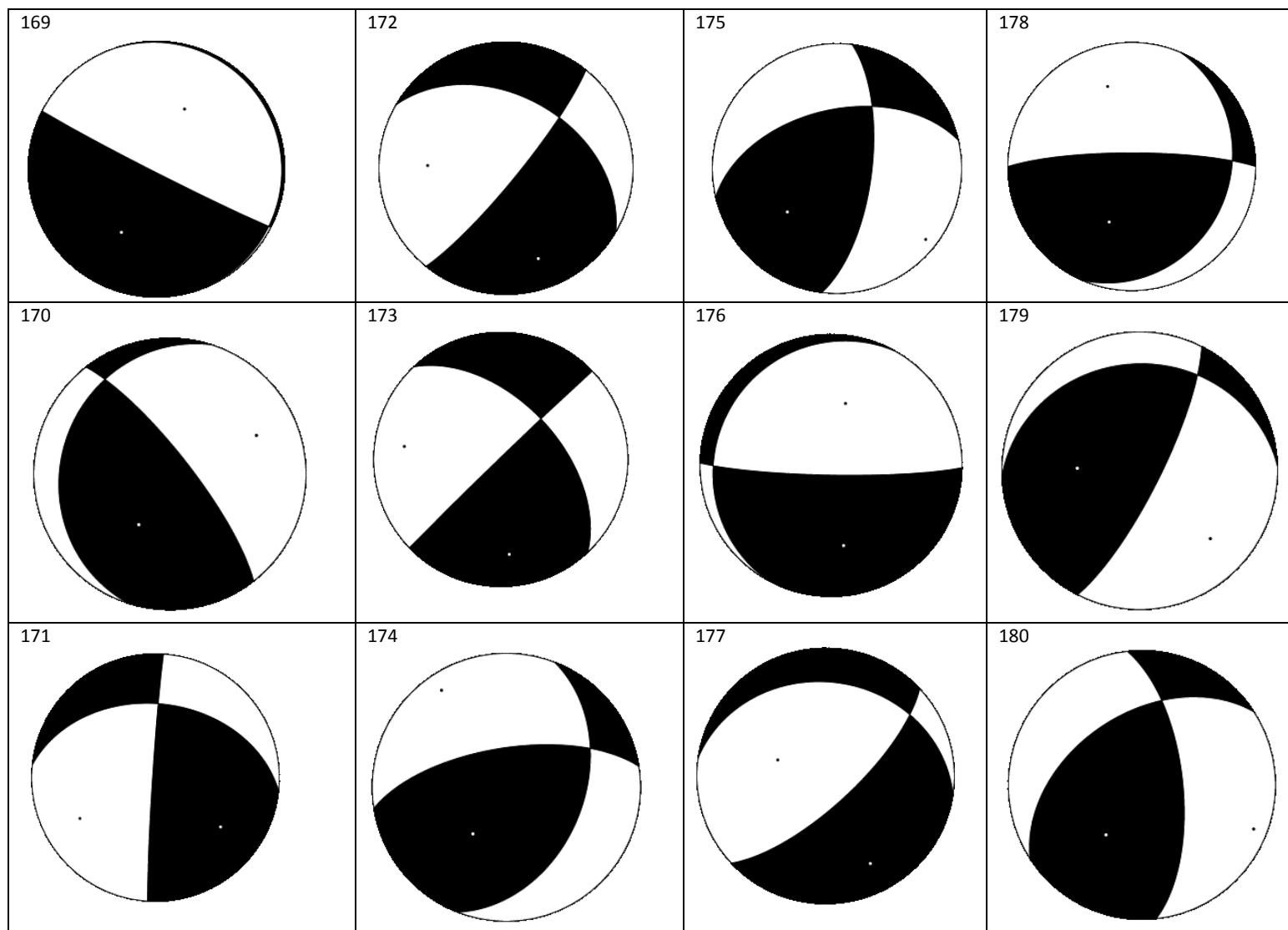


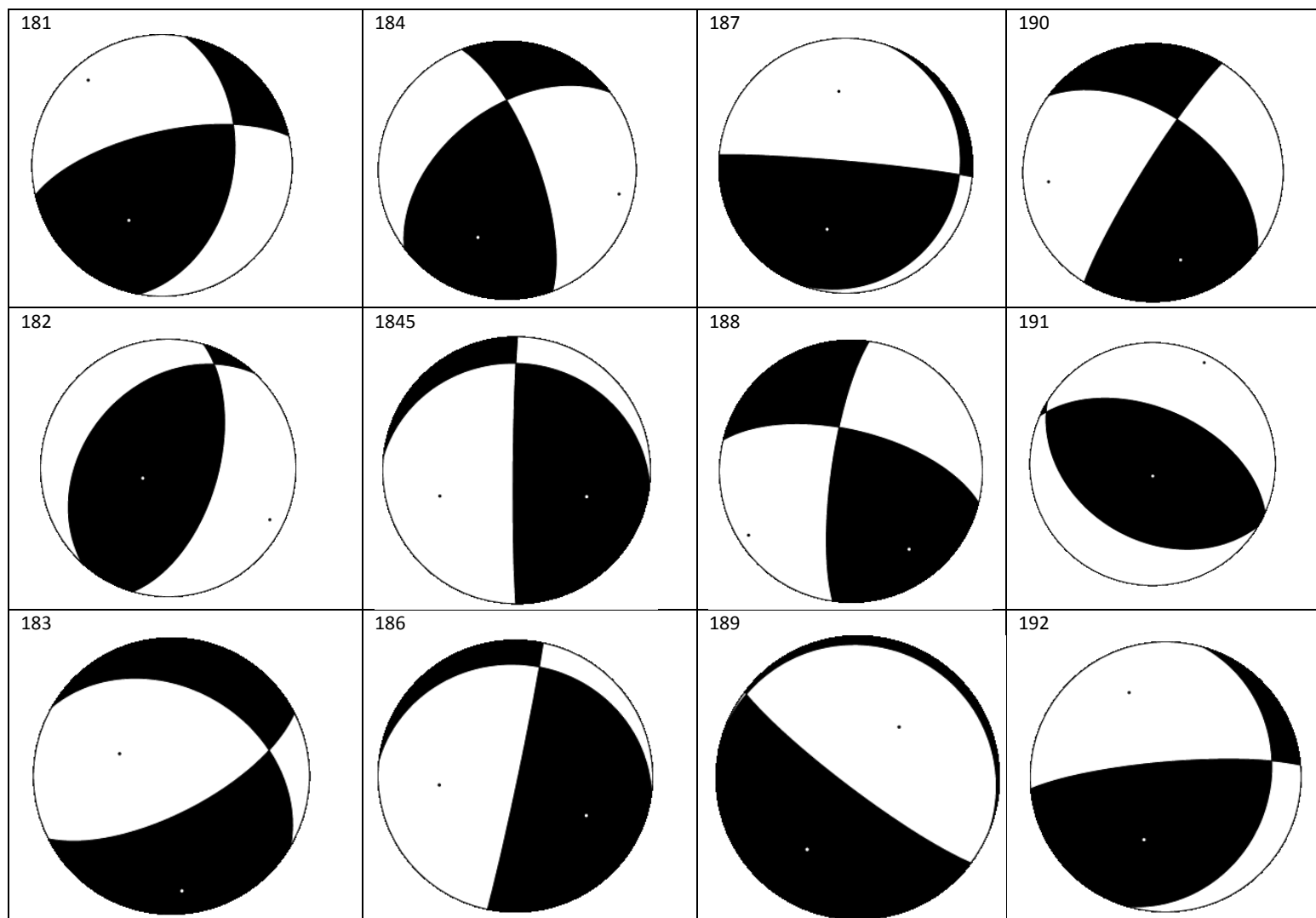


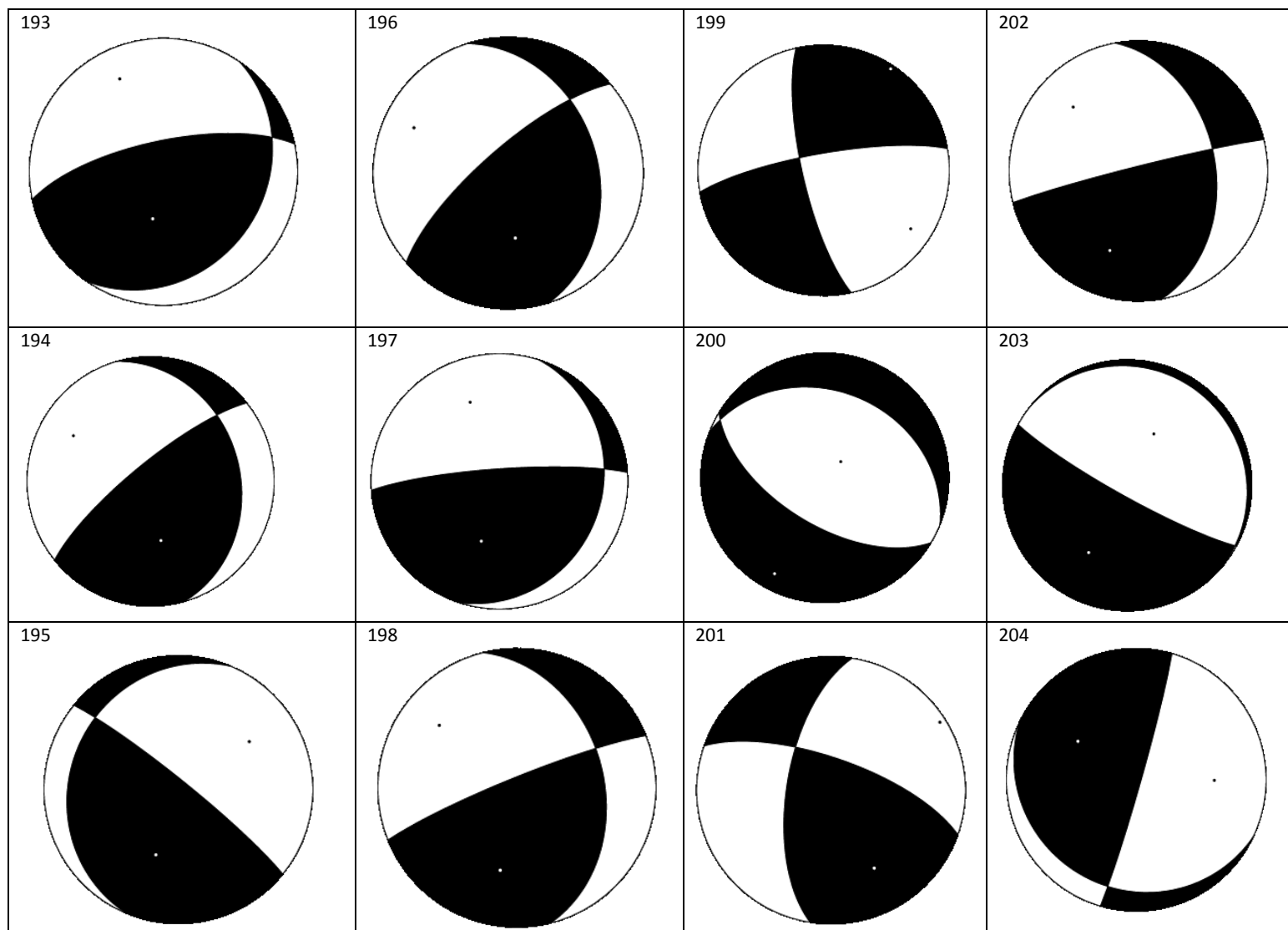


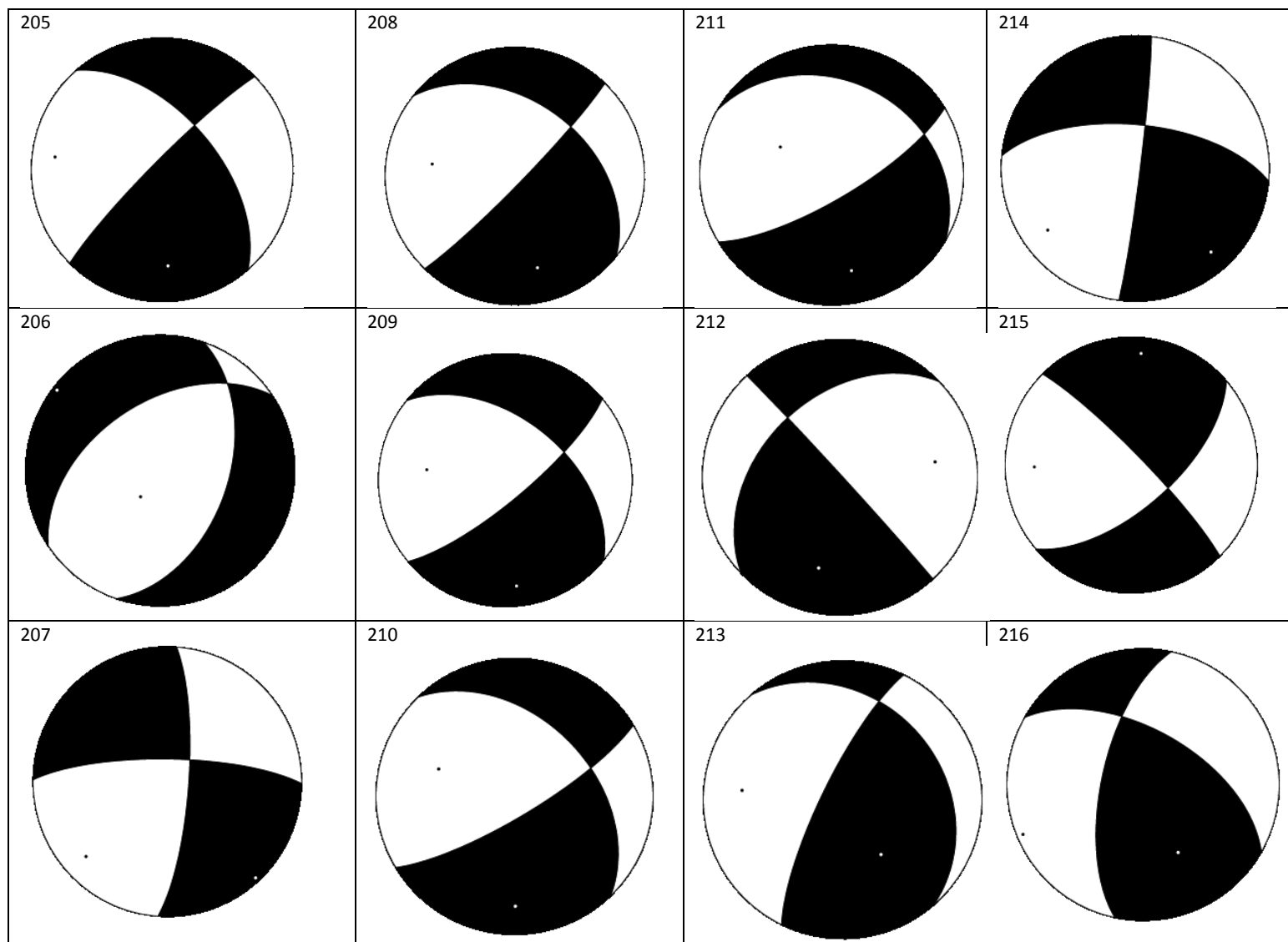


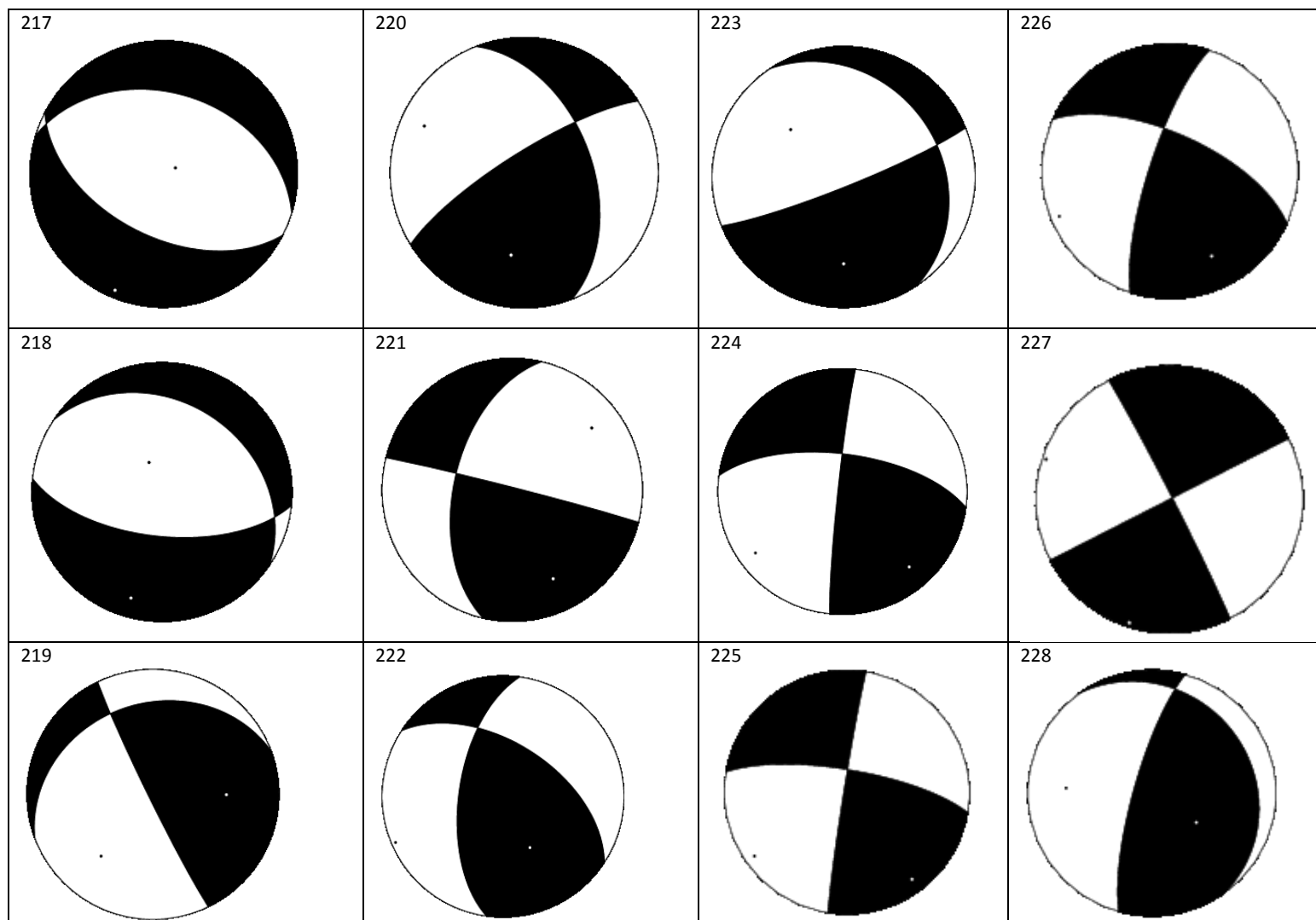


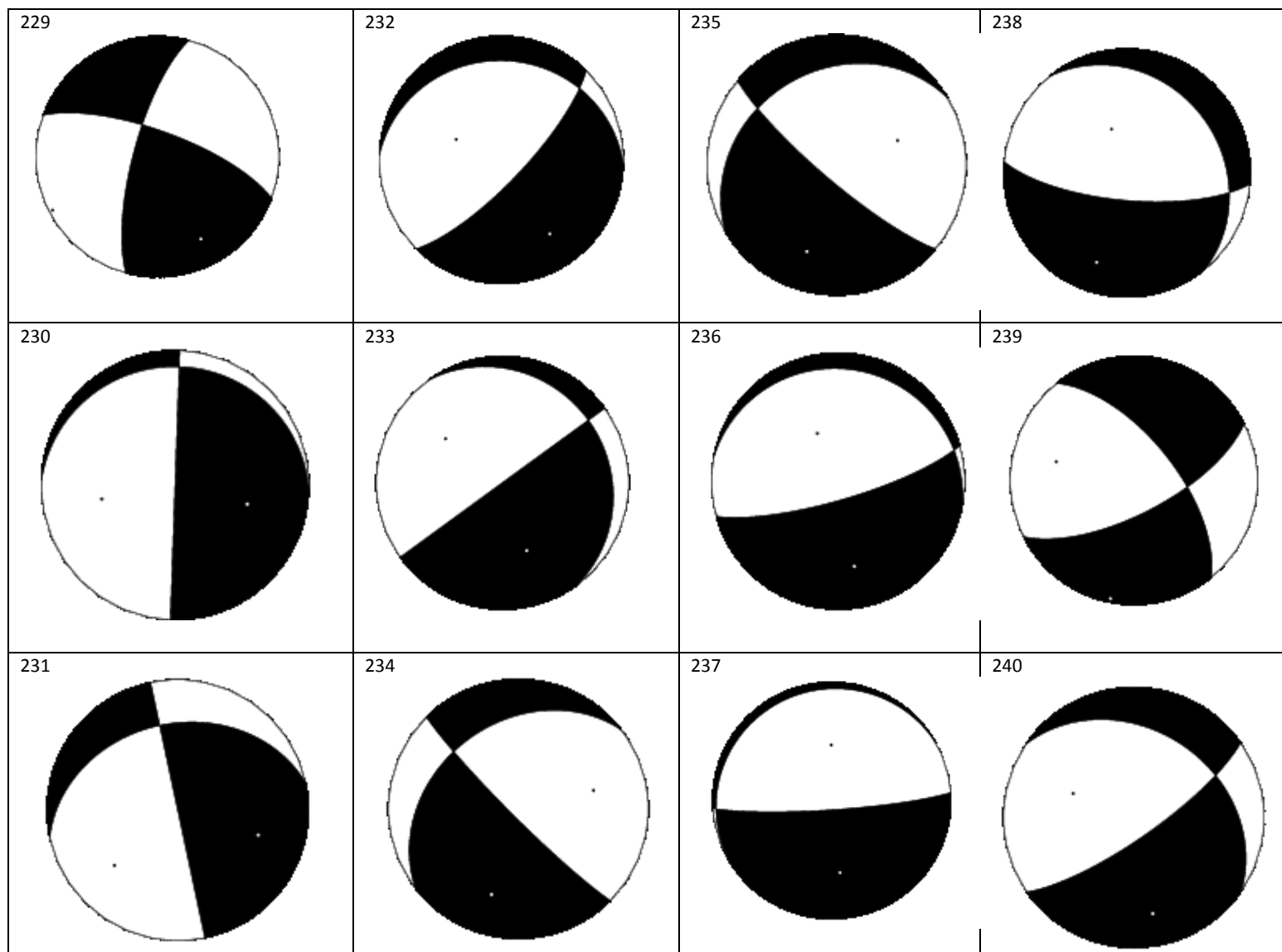


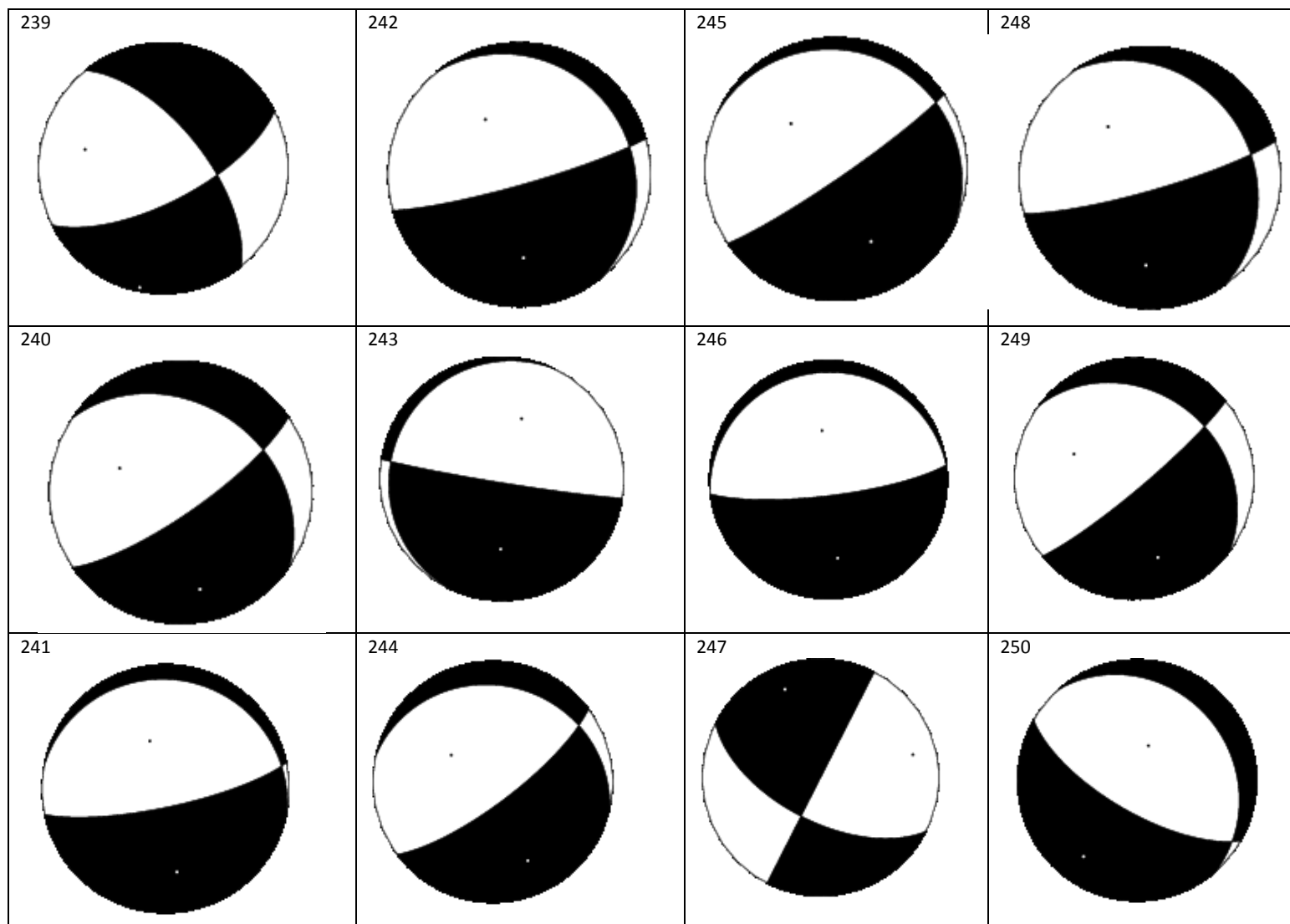


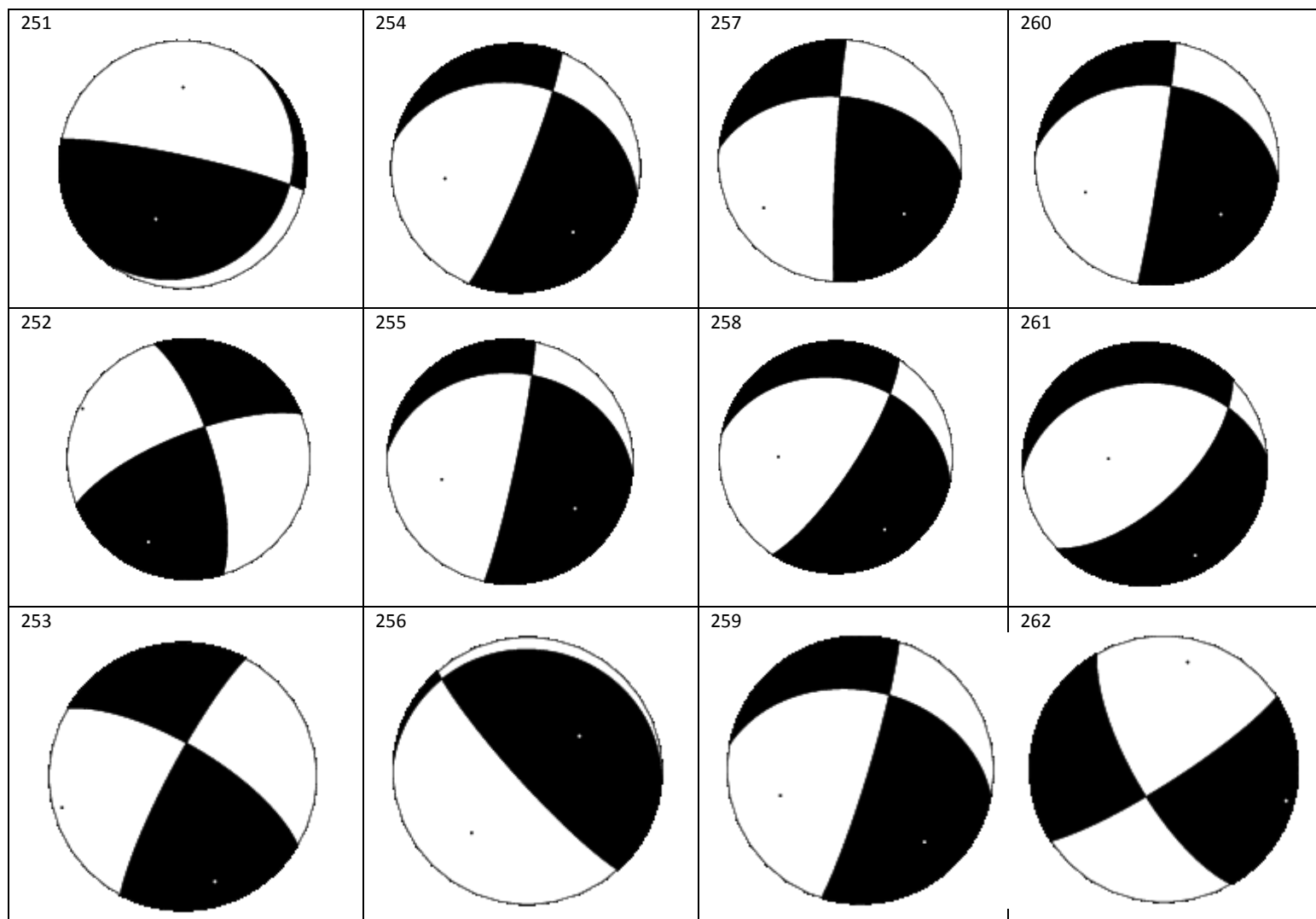


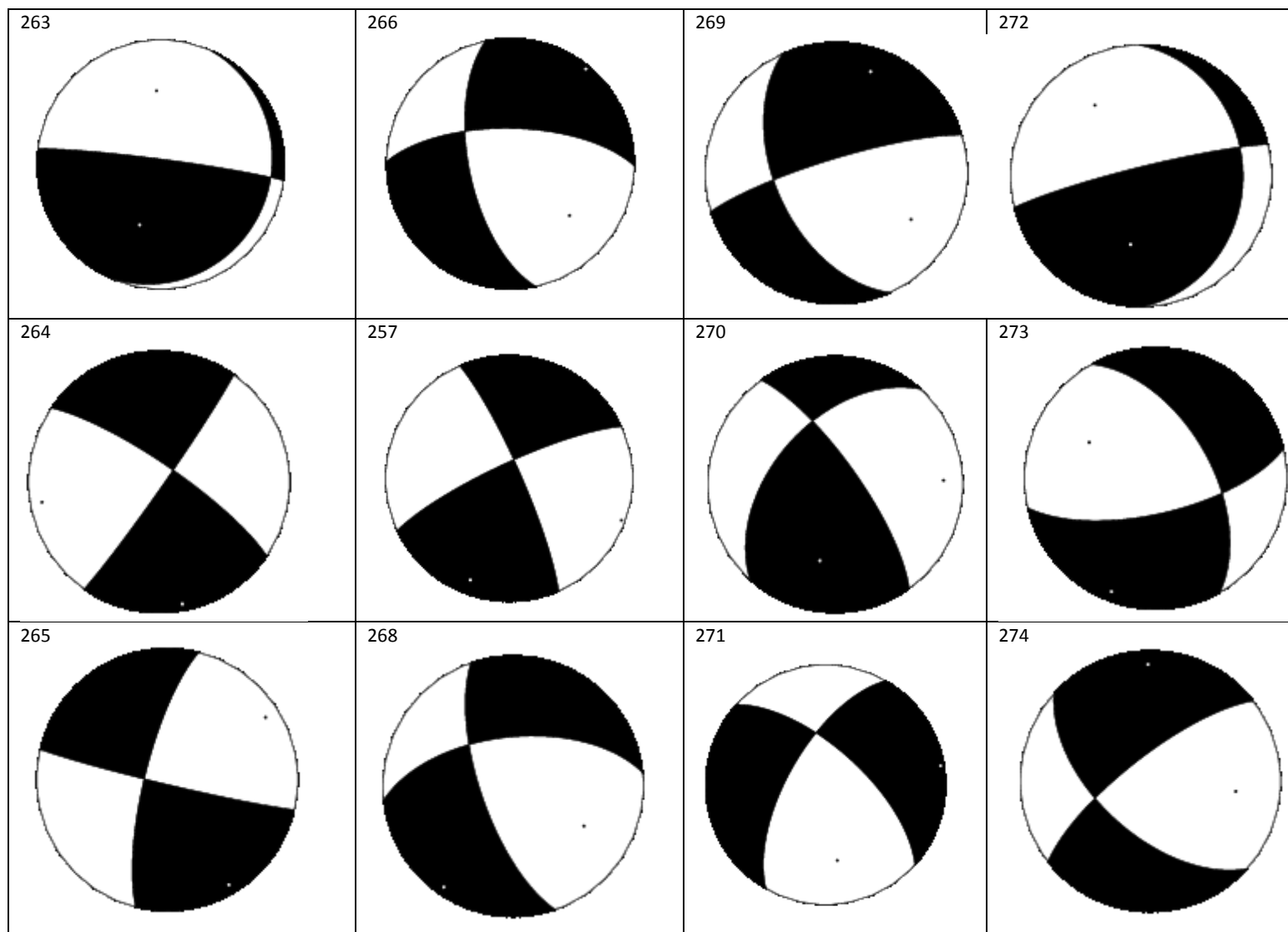


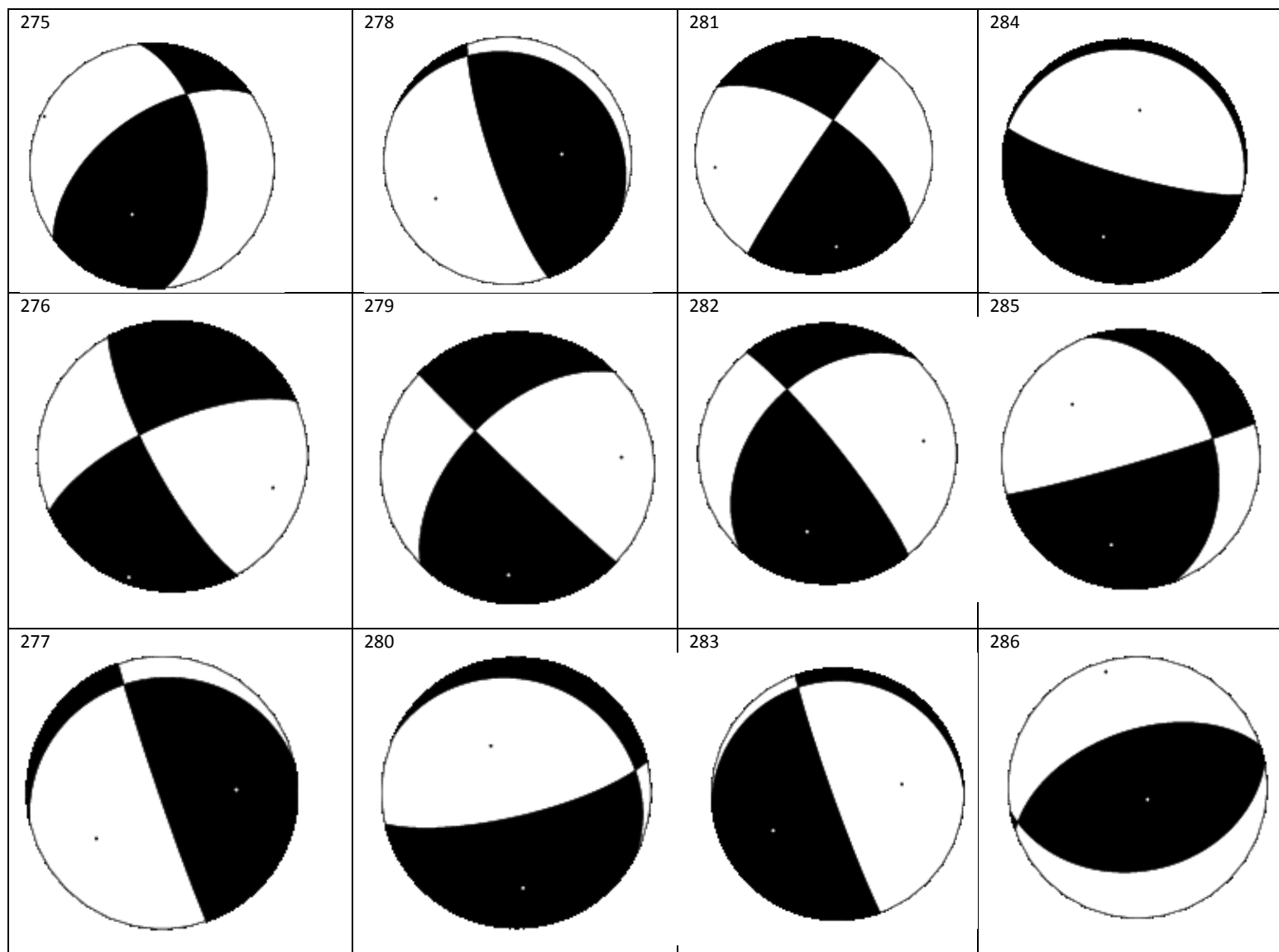


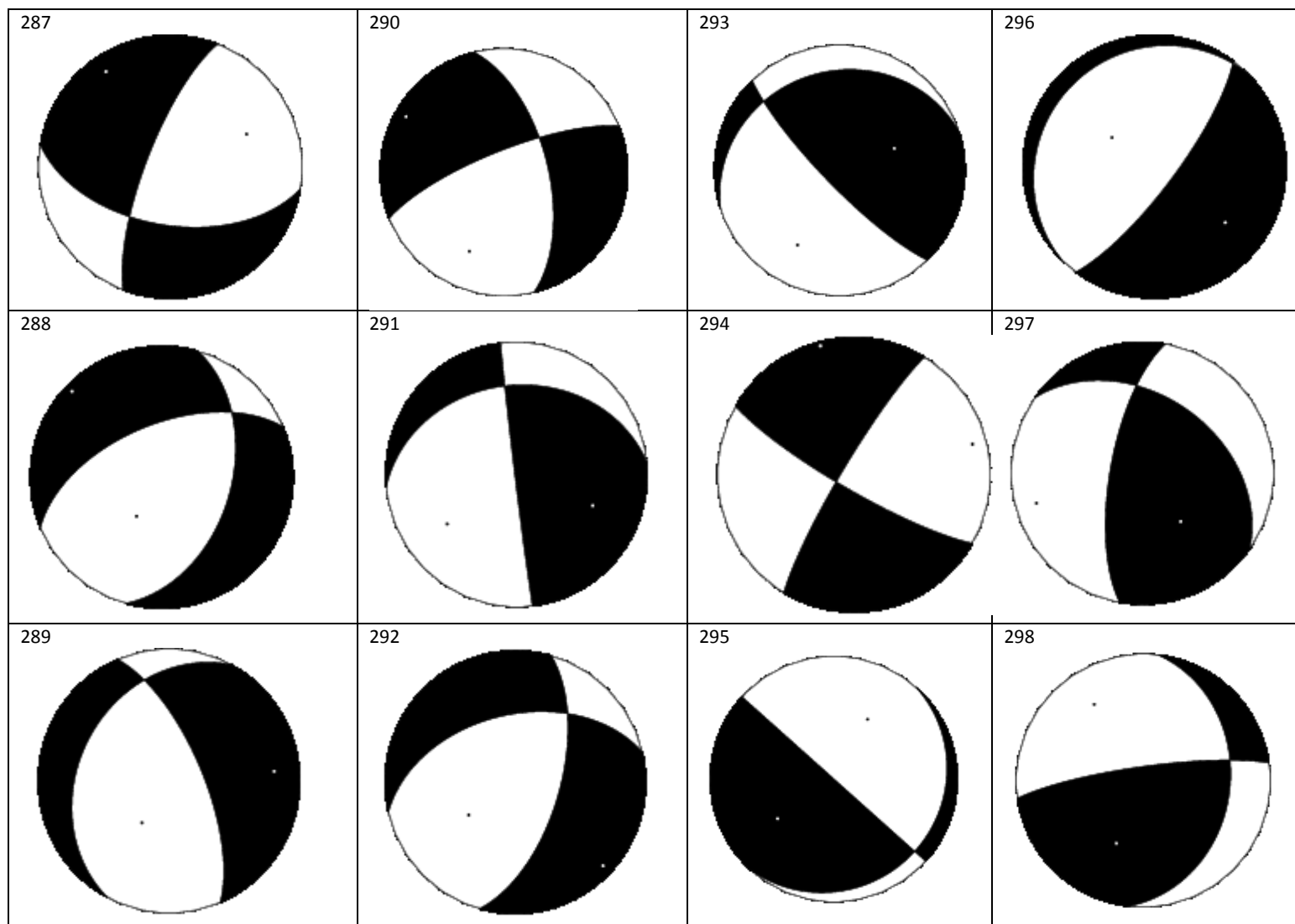


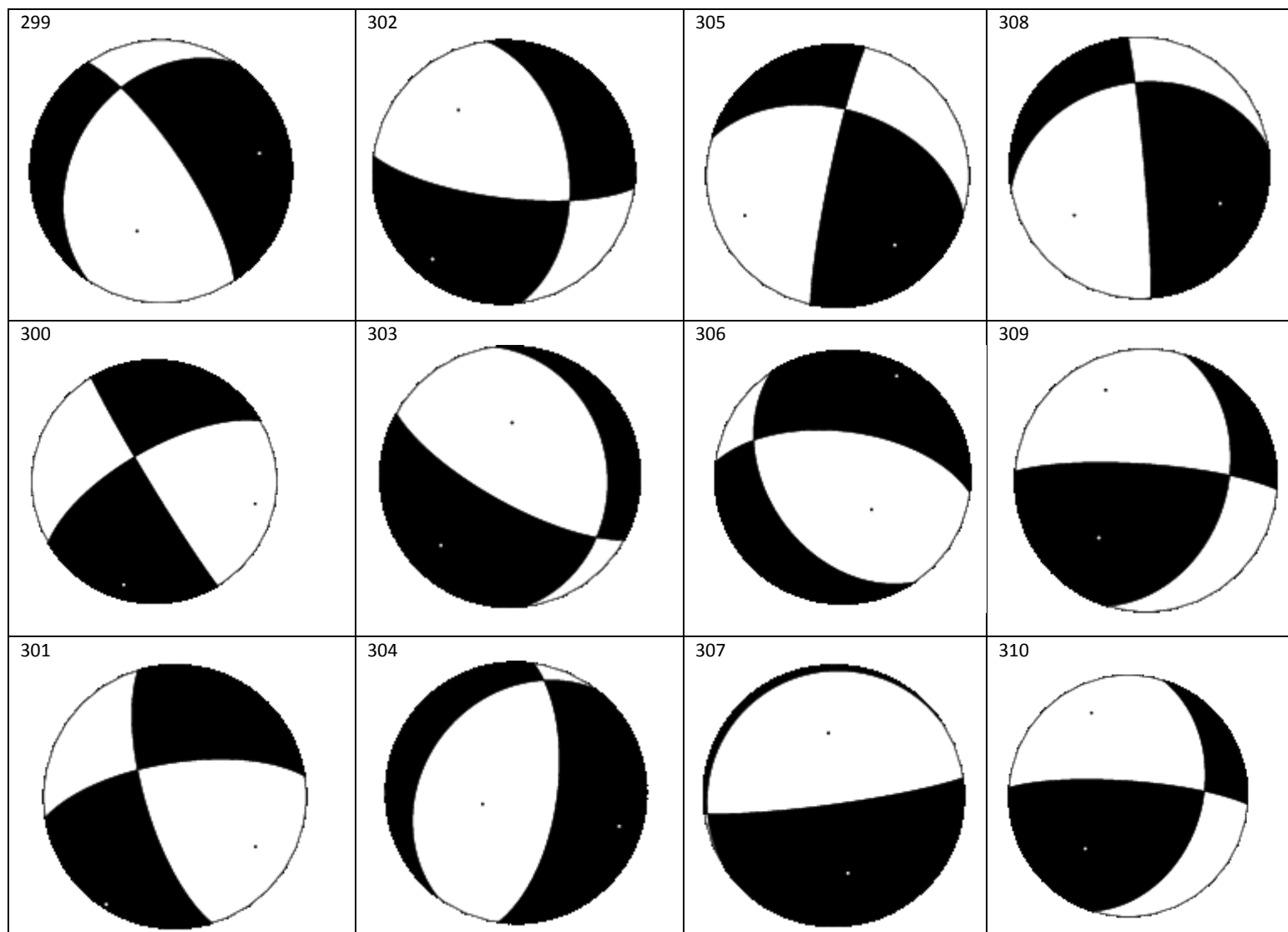


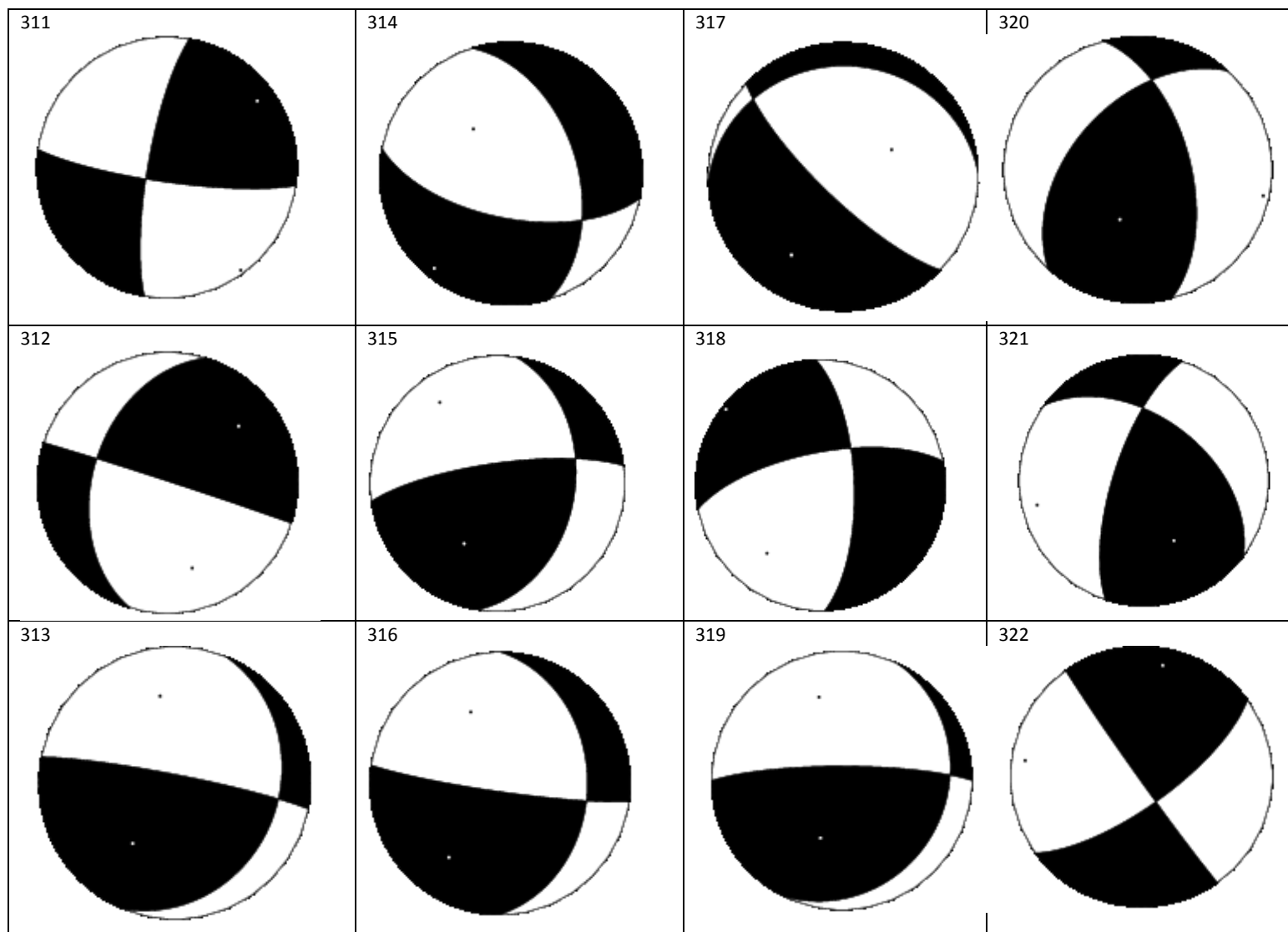


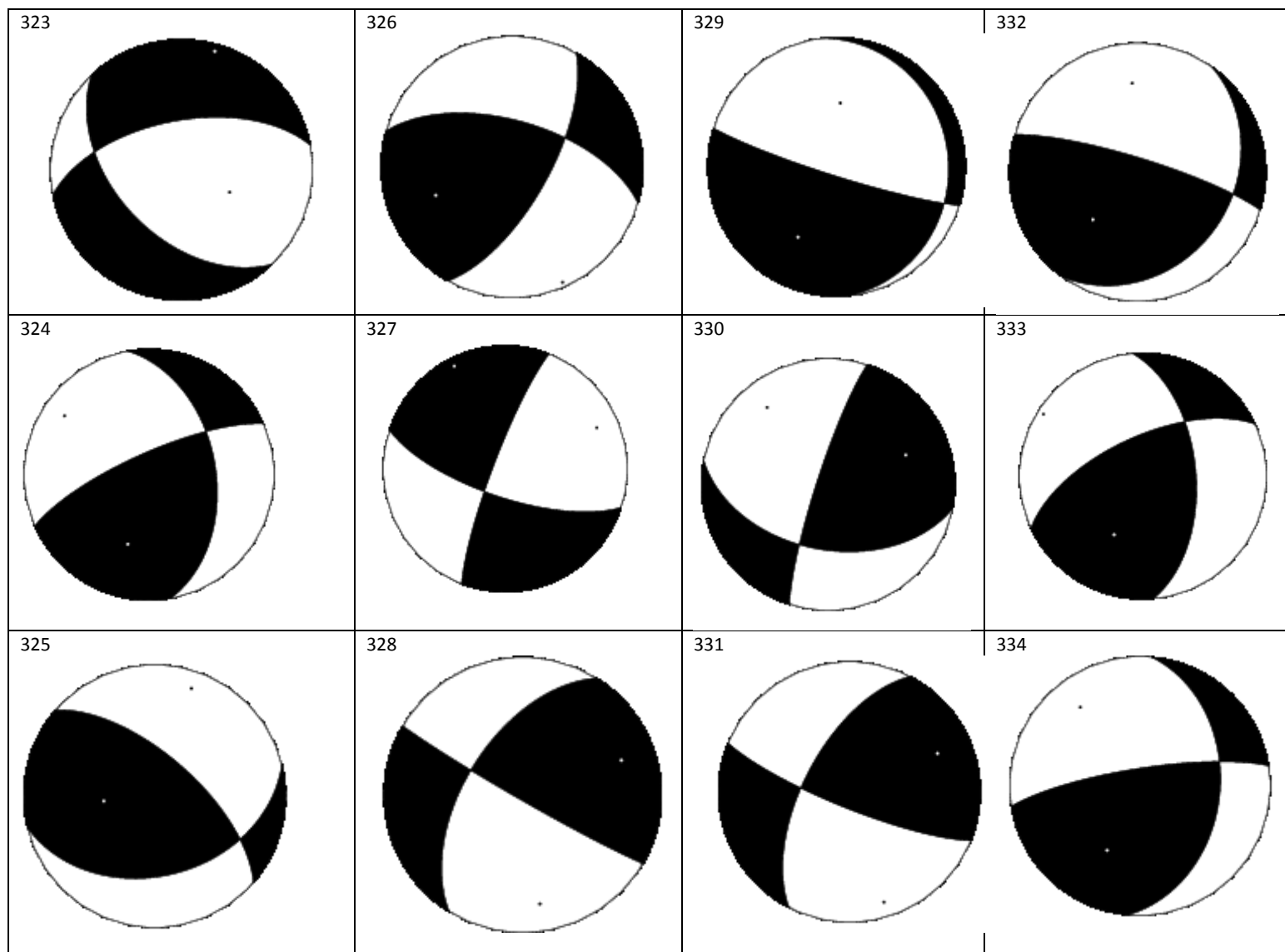


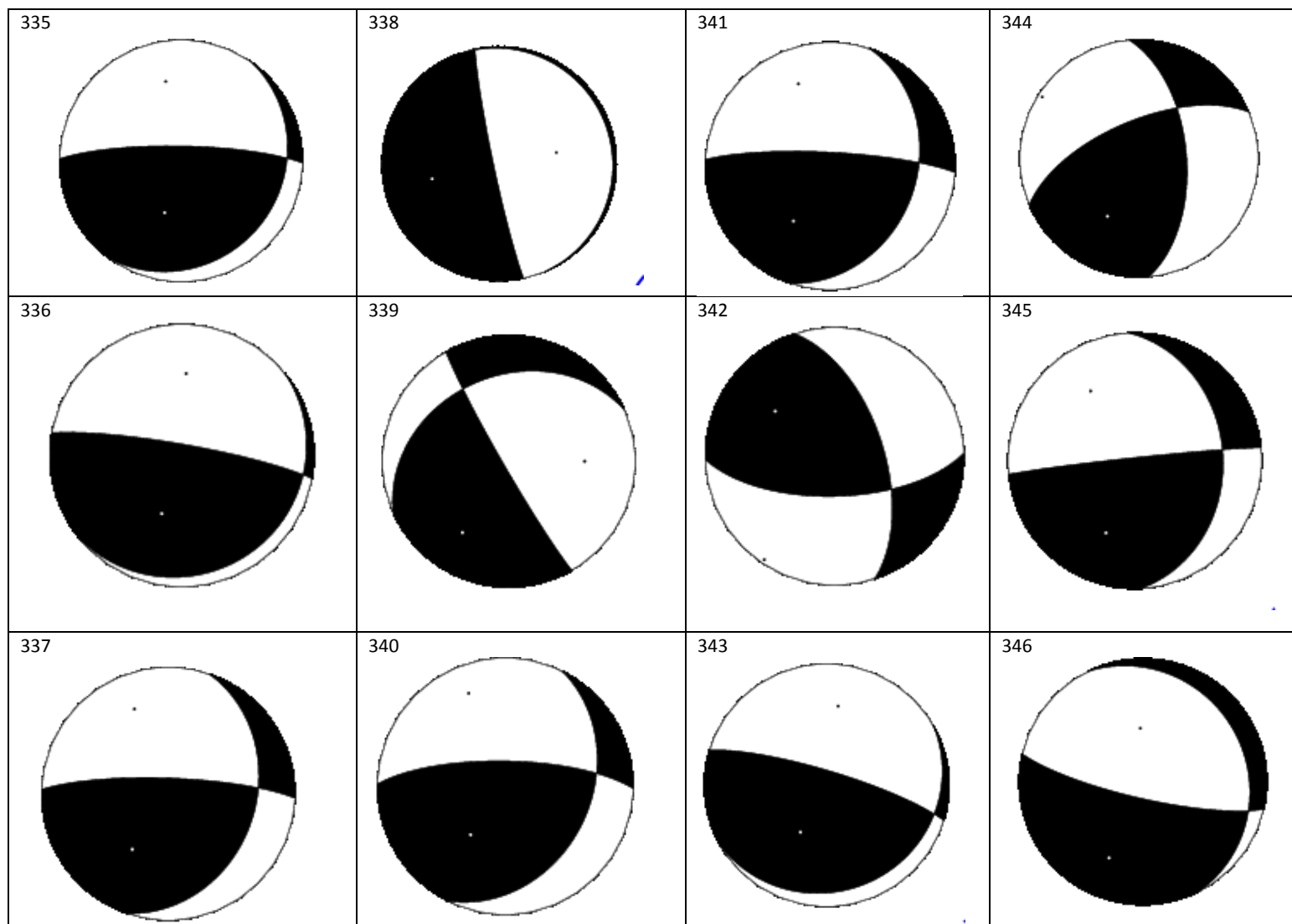


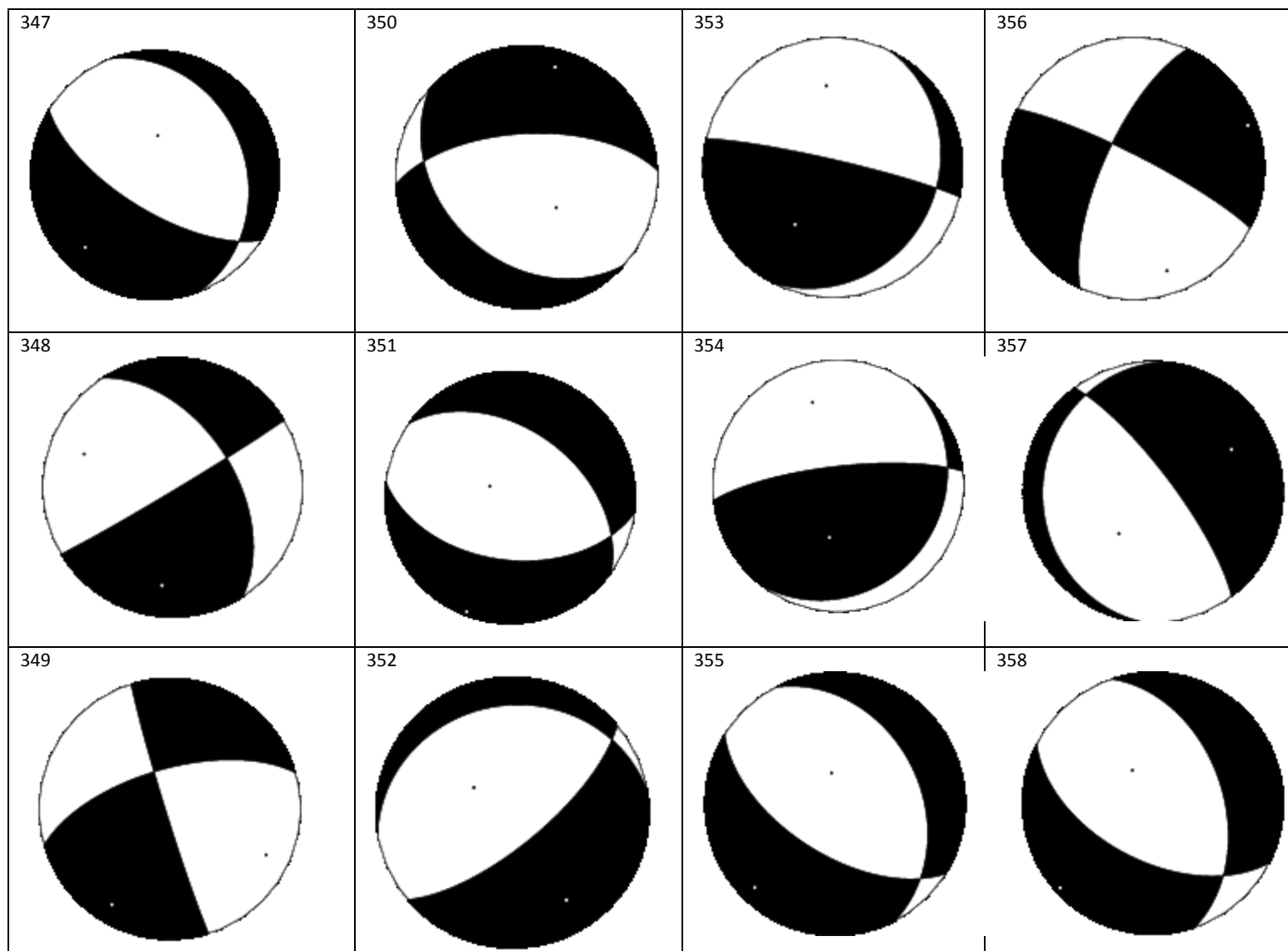


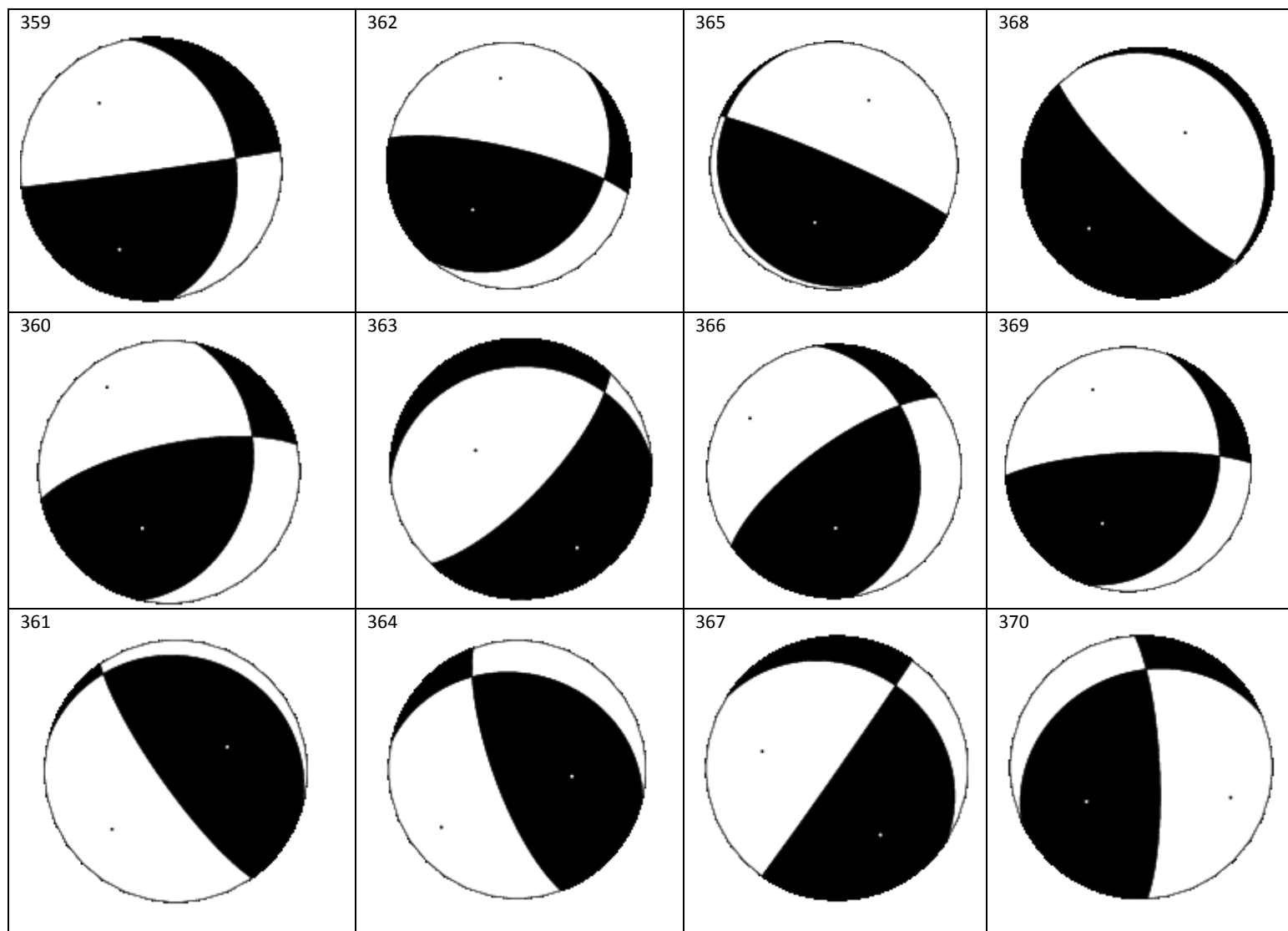


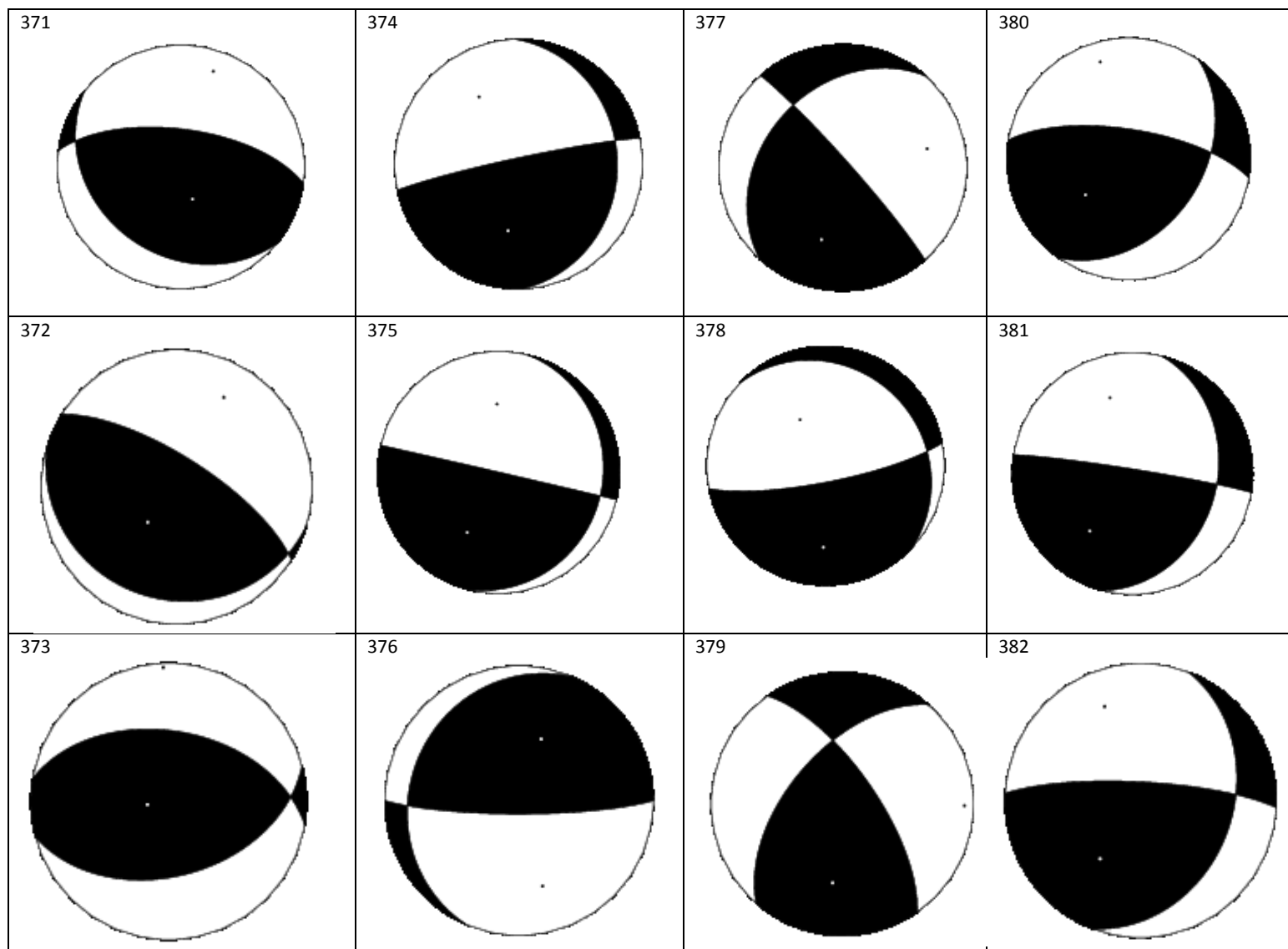


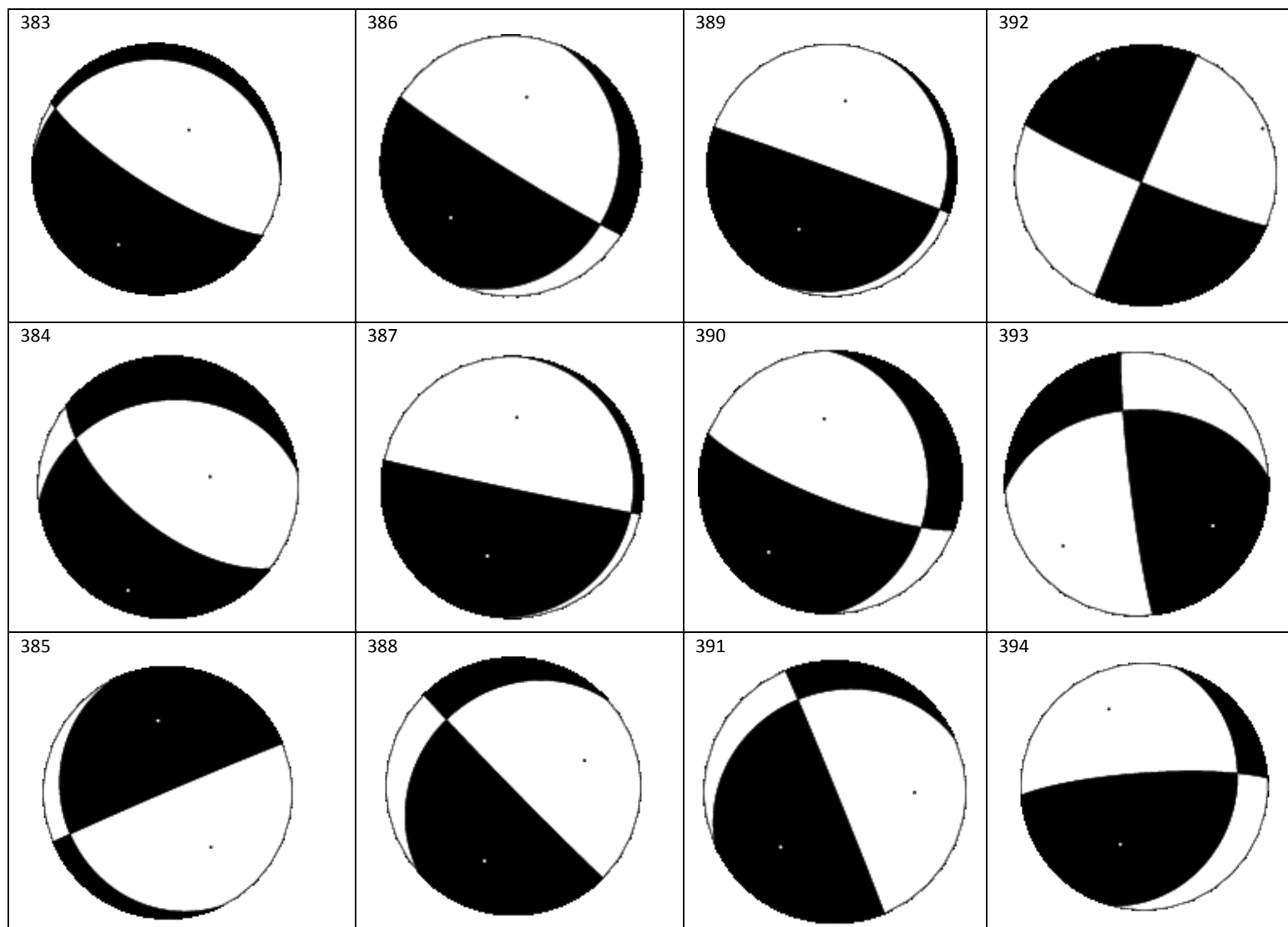


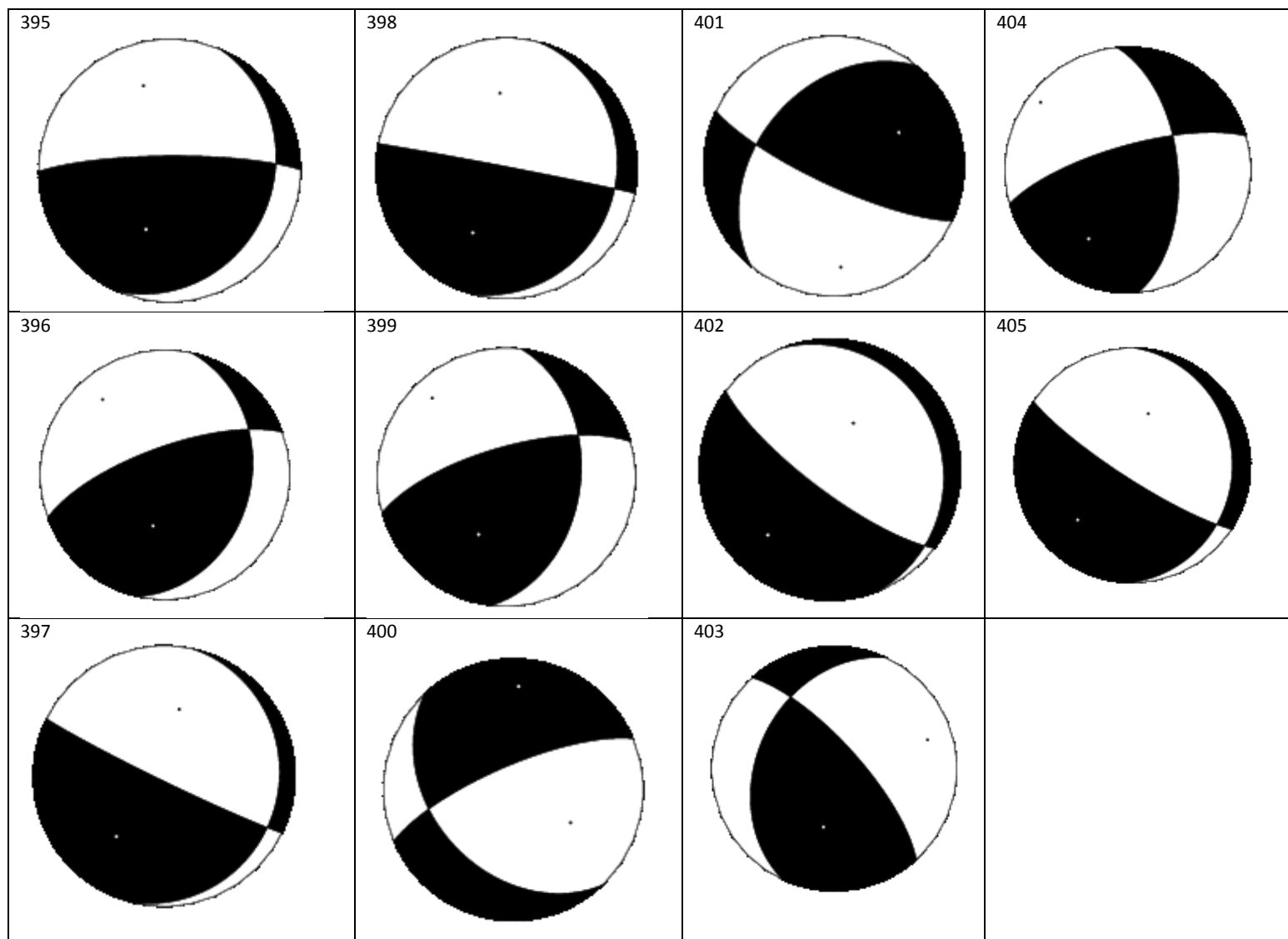












Bibliografía

- Álvarez-Gómez, J. (2015). FMC: A program to manage, classify and plot focal mechanism data.
- Anderson, E. (1951). The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain (2nd ed., p. 206). Edinburgh: Oliver and Boyd
- Angelier, J. (1979). Determination of the mean principal directions of stresses for a given fault population. *Tectonophysics*, 56(3-4), T17-T26.
- Angelier, J. (1984). Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7), 5835-5848.
- Angelier, J. (2002). Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress IV-a new method free of choice among nodal planes. *Geophysical Journal International*, 150(3), 588-609.
- Angelier, J. & Mechler, P. (1977). Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales egalement utilisables en tectonique et en seismologie: la methode des diedres droits. *Bulletin De La Societe Geologique De France*, S7-XIX(6), 1309-1318.
- Antayhua-Vera, Y., Lermo-Samaniego, J., Quintanar-Robles, L., & Campos-Enríquez, O. (2015). Seismic activity and stress tensor inversion at Las Tres Vírgenes Volcanic and Geothermal Field (México). *Journal Of Volcanology And Geothermal Research*, 305, 19-29.
- Armijo, R., Carey, E., & Cisternas, A. (1982). The inverse problem in microtectonics and the separation of tectonic phases. *Tectonophysics*, 82(1-2), 145-160.
- Arthaud, F. (1969). Methode de determination graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermediaire d'une population de failles. *Bulletin De La Societe Geologique De France*, S7-XI(5), 729-737.
- Bocanegra, L.C., y Sánchez, J.J. 2017. Mapa de fallas de los volcanes Chiles-Cerro Negro (Nariño) a partir de minería de datos y confirmación de campo. *Boletín de Geología*, 39(3): 71-86.

- Bott, M. (1959). The Mechanics of Oblique Slip Faulting. *Geological Magazine*, 96(02), 109.
- Carey, S., (1958). A tectonic approach to continental drift. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*, 95, 9153 - 9170.
- Carey, E. & B. Brunier, (1974). Analyse théorique et numérique d'une modele élémentaire appliqué a l'étude d'une population de failles. *Comptes Rendus de l'Académie des Science. Paris*, 279 (D), 891 - 894.
- Cocina, O., Neri, G., Privitera, E., & Spampinato, S. (1997). Stress tensor computations in the mount Etna area (Southern Italy) and tectonic implications. *Journal Of Geodynamics*, 23(2), 109-127.
- Collot, J., Agudelo, W., Ribodetti, A., & Marcaillou, B. (2008). Origin of a crustal splay fault and its relation to the seismogenic zone and underplating at the erosional north Ecuador–south Colombia oceanic margin. *Journal Of Geophysical Research*, 113(B12).
- Corponariño. (2009). Estudio sobre estado actual del páramo de Chiles. 151p.
- Corredor, F. (2003). Seismic strain rates and distributed continental deformation in the northern Andes and three-dimensional seismotectonics of northwestern South America. *Tectonophysics*, 372(3-4), 147-166.
- Cortés, M., Colletta, B., & Angelier, J. (2006). Structure and tectonics of the central segment of the Eastern Cordillera of Colombia. *Journal Of South American Earth Sciences*, 21(4), 437-465.
- Ebmeier, S., Elliott, J., Nocquet, J., Biggs, J., Mothes, P., Jarrín, P., Yépez, M., Aguaiza, S., Lundgren, P. and Samsonov, S. (2016). Shallow earthquake inhibits unrest near Chiles–Cerro Negro volcanoes, Ecuador–Colombian border. *Earth and Planetary Science Letters*, 450, pp.283-291.
- Etchecopar, A., Vasseur, G., & Daignieres, M. (1981). An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *Journal Of Structural Geology*, 3(1), 51-65.
- Frohlich, C., (1992), Triangle diagrams: Ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms, *Phys. EarthPlanet. Inter.* 193 – 198.
- Frohlich, C. & Davis, S. (1999). How well constrained are well-constrained T , B , and P axes in moment tensor catalogs?. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B3), 4901-4910.
- Frohlich, C., Coffin, M., Massell, C., Mann, P., Schuur, C., & Davis, S. et al. (1997). Constraints on Macquarie Ridge tectonics provided by Harvard focal mechanisms

- and teleseismic earthquake locations. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3), 5029-5041.
- García, Y. K. (2016). Contribuciones geológicas al modelo geotérmico conceptual en la región de los volcanes Chiles - Cerro Negro. Trabajo de Grado, Universidad Nacional de Colombia-Sede Bogotá, 36p
- Gephart, J. (1990). Stress and the direction of slip on fault planes. *Tectonics*, 9(4), 845-858.
- Gephart, J. & Forsyth, D. (1984). An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando Earthquake Sequence. *Journal Of Geophysical Research*, 89(B11), 9305.
- Gillard, D. & Wyss, M. (1995). Comparison of strain and stress tensor orientation: Application to Iran and southern California. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B11), 22197-22213.
- Gillard, D., Wyss, M., & Nakata, J. (1992). A seismotectonic model for western Hawaii based on stress tensor inversion from fault plane solutions. *Journal Of Geophysical Research*, 97(B5), 6629.
- Gutscher, M., Malavieille, J., Lallemand, S., & Collot, J. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth And Planetary Science Letters*, 168(3-4), 255-270.
- Hardebeck, J. & Hauksson, E. (2001). Stress Orientations Obtained from Earthquake Focal Mechanisms: What Are Appropriate Uncertainty Estimates?. *Bulletin Of The Seismological Society Of America*, 91(2), 250-262.
- Hardebeck, J. & Shearer, P. (2002). A New Method for Determining First-Motion Focal Mechanisms. *Bulletin Of The Seismological Society Of America*, 92(6), 2264-2276.
- Hill, D. (1977). A model for earthquake swarms. *Journal Of Geophysical Research*, 82(8), 1347-1352.
- Jolly, A., Page, R., & Power, J. (1994). Seismicity and stress in the vicinity of Mount Spurr volcano, south central Alaska. *Journal Of Geophysical Research*, 99(B8), 15305.
- Kelleher, J. & McCann, W. (1976). Buoyant zones, great earthquakes, and unstable boundaries of subduction. *Journal Of Geophysical Research*, 81(26), 4885-4896.
- Lahr, J., Chouet, B., Stephens, C., Power, J. and Page, R. (1994). Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989–1990 eruptions at redoubt volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 62(1-4), pp.137-151

- Lu, Z. & Wyss, M. (1996). Segmentation of the Aleutian plate boundary derived from stress direction estimates based on fault plane solutions. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B1), 803-816.
- Manchuel, K., Régnier, M., Béthoux, N., Font, Y., Sallarès, V., Díaz, J., & Yepes, H. (2011). New insights on the interseismic active deformation along the North Ecuadorian-South Colombian (NESC) margin. *Tectonics*, 30(4).
- Menand, T., K. A. Daniels, and P. Benghiat (2010), Dyke propagation and sill formation in a compressive tectonic environment, *J. Geophys. Res.*, 115, B08201.
- Michael, A. (1984). Determination of stress from slip data: Faults and folds. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B13), 11517-11526.
- Michael, A. (1987). Use of focal mechanisms to determine stress: A control study. *Journal Of Geophysical Research*, 92(B1), 357.
- Moeck, I., Schandelmeier, H. and Holl, H. (2008). The stress regime in a Rotliegend reservoir of the Northeast German Basin. *International Journal of Earth Sciences*, 98(7), pp.1643-1654.
- Muñoz, A. & G. de Vicente, (2010) Análisis de esfuerzos tectónicos. Fallas y sismos. Reduca. Serie tectónica, Universidad Complutense de Madrid, ISSN 1989 - 6557.
- Musumeci, C., Malone, S.D., Giampiccolo, E., Gresta, S. (2000). Stress tensor computations at Mount St. Helens (1995-1998). *Annali di Geofisica*. 43(5), 889 – 904.
- Nakamura, K. (1977). Volcanoes as possible indicators of tectonic stress orientation — principle and proposal. *Journal Of Volcanology And Geothermal Research*, 2(1), 1-16.
- Ocampo, J & Sánchez, J. (2014) Calidad y variabilidad de las determinaciones de MF en el margen occidental de Sur América: Implicaciones en el análisis de estado de esfuerzos (p. 132). Editorial académica española.
- Pegoraro, O. et al., (1972), Application de la microtectonique a un étude de néotectonique. Le golfe Maliaque (Grece centrale). These Illeme cycle, USTL Montpellier, 41.
- Pennington, W. (1981). Subduction of the Eastern Panama Basin and seismotectonics of northwestern South America. *Journal Of Geophysical Research: Solid Earth*, 86(B11), 10753-10770.
- Perdomo, G., Ardila, R., y Meneses, L. 1986. Estudio geológico para prospección de azufre en el área de Cumbal – Chiles – Mayasquer (Nariño). Trabajo de Grado, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. 145p.

-
- Plateaux, R., Béthoux, N., Bergerat, F., & Mercier de Lépinay, B. (2014). Volcano-tectonic interactions revealed by inversion of focal mechanisms: stress field insight around and beneath the Vatnajökull ice cap in Iceland. *Frontiers In Earth Science*, 2, 1 - 21.
- Reches, Z. (1983). Faulting of rocks in three-dimensional strain fields II. Theoretical analysis. *Tectonophysics*, 95(1-2), 133-156.
- Reches, Z. (1987). Determination of the tectonic stress tensor from slip along faults that obey the Coulomb yield condition. *Tectonics*, 6(6), 849-861.
- Reches, Z., Baer, G., & Hatzor, Y. (1992). Constraints on the strength of the upper crust from stress inversion of fault slip data. *Journal Of Geophysical Research*, 97(B9), 12481.
- Roman, D., Moran, S., Powar, J. & Cashman, K (2004). Temporal y spatial variation of local stress fields before and after the eruption of Crater Peak Vent, Mount Spurr, Alaska. *Bulletin Of The Seismological Society Of America*, 94(6), 2366-2379.
- Sanchez, J. & Nunez-Cornu, F. (2009). Seismicity and Stress in a Tectonically Complex Region: The Rivera Fracture Zone, the Rivera-Cocos Boundary, and the Southwestern Jalisco Block, Mexico. *Bulletin Of The Seismological Society Of America*, 99(5), 2771-2783.
- Sánchez, J., Wyss, M., & R. McNutt, S. (2004). Temporal-spatial variations of stress at Redoubt volcano, Alaska, inferred from inversion of fault plane solutions. *Journal Of Volcanology And Geothermal Research*, 130(1-2), 1-30.
- SGC – Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (2013). Informe mensual de actividad de los Volcanes Galeras, Cumbal, Doña Juana, Azufral, Las Ánimas, Chiles Y Cerro Negro, Noviembre De 2013.
- SGC – Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (2016). Informe mensual de actividad de los Volcanes Galeras, Cumbal, Doña Juana, Azufral, Las Ánimas, Chiles Y Cerro Negro, Diciembre de 2015.
- Shan, Y. & Liang, X. (2015). Inversion of fault data with low diversity for stress: Principles and applications. *Journal Of Structural Geology*, 77, 228-238.
- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H. and Stix, J. The encyclopedia of volcanoes.
- Taboada, A., Rivera, L., Fuenzalida, A., Cisternas, A., Philip, H., & Bijwaard, H. et al. (2000). Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia). *Tectonics*, 19(5), 787-813.

- Terakawa, T., Kato, A., Yamanaka, Y., Maeda, Y., Horikawa, S., Matsuhiro, K. and Okuda, T. (2016). Monitoring eruption activity using temporal stress changes at Mount Ontake volcano. *Nature Communications*, 7, p.10797.
- Toro R., & Osorio, J. (2005). Determinación de los tensores de esfuerzos actuales para el segmento norte de los Andes calculados a partir de MF de sismos mayores. *Boletín de Geología*. Vol27, No 44.
- Ui, T., Nakamura, K., & Shibahashi, K. (1977). 1974 activity of chokai volcano, Japan. *Bulletin Volcanologique*, 40(4), 231-238.
- Velásquez, M. & Parra, E. (2002). Geología de las planchas 447-Ipiales y 447 Bis-Tallambí, Memoria explicativa.
- Vetter, U. & Ryall, A. (1983). Systematic change of focal mechanism with depth in the Western Great Basin. *Journal Of Geophysical Research*, 88(B10), 8237.
- Wallace, R. (1951). Geometry of Shearing Stress and Relation to Faulting. *The Journal Of Geology*, 59(2), 118-130.
- Wiemer, S. (2001). A Software Package to Analyze Seismicity: ZMAP. *Seismological Research Letters*, 72(3), 373-382.
- Wyss, M. & Lu, Z. (1995). Plate boundary segmentation by stress directions: Southern San Andreas Fault, California. *Geophysical Research Letters*, 22(5), 547-550.
- Wyss, M., Gllard, D., & Liang, B. (1992). An estimate of the absolute stress tensor in Kaoiki, Hawaii. *Journal Of Geophysical Research*, 97(B4), 4763.
- Yang, Y.-R., K. M. Johnson, and R. Y. Chuang (2013), Inversion for absolute deviatoric crustal stress using focal mechanisms and coseismic stress changes: The 2011 M9 Tohoku-oki, Japan, earthquake, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 118, 5516–5529, doi:10.1002/jgrb.50389